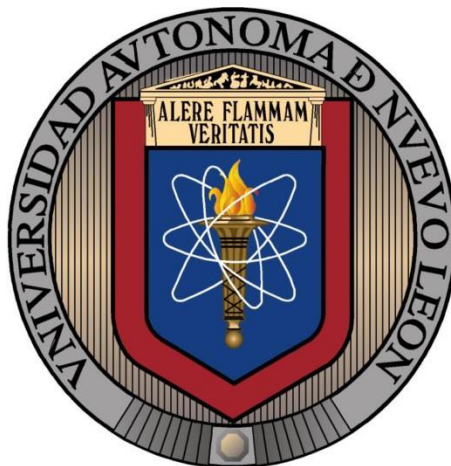


# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



### **INDICADORES COMO INFORMACIÓN BASE PARA EL ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL: HUELLA HÍDRICA, HUELLA ECOLÓGICA Y HUELLA DE CARBONO**

**POR**

**MARCO ANTONIO MARTÍNEZ RUIZ**

**Como requisito para obtener el Grado de**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**Con Orientación en Ingeniería Ambiental**

**JUNIO DE 2013**

# Tabla de contenido

Capítulo	Pág.
<b>Resumen</b>	
<b>Lista de figuras</b>	
<b>Lista de tablas</b>	
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	6
1.3 Hipótesis	7
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
<b>2 Huella Hídrica</b>	<b>8</b>
2.1 Introducción	8
2.2 Metodología	12
2.2.1 Huella Hídrica de una etapa de proceso	16
2.2.1.1 Huella Hídrica Azul	17
2.2.1.2 Huella Hídrica Verde	21
2.2.1.3 Huella Hídrica Gris	23
2.2.2 Huella Hídrica Verde, Azul y Gris de un cultivo o árbol	29

2.2.3 Huella Hídrica de un producto	35
2.2.4 Huella Hídrica de un consumidor o grupo de consumidores	39
2.2.5 Huella Hídrica de un área geográficamente delimitada	40
2.2.6 Contabilidad de la Huella Hídrica Nacional	41
2.2.6.1 Marco de contabilización de la Huella Hídrica Nacional	41
2.2.6.2 Cálculo de la Huella Hídrica de un país	44
2.2.6.3 Cálculo del consumo nacional de la Huella Hídrica	44
2.2.6.4 Ahorros hídricos relacionados con el comercio	46
2.2.6.5 Dependencia hídrica nacional comparada contra la autosuficiencia hídrica	48
2.2.7 Contabilidad de la Huella Hídrica para áreas de captación y cuencas	49
2.2.8 Huella Hídrica de una empresa/negocio	50
<b>3 Huella Ecológica</b>	<b>54</b>
3.1 Introducción	54
3.2 Metodología	57
3.2.1 Integración de los elementos que componen la Huella Ecológica	61
3.2.1.1 Carbono y energía	61
3.2.1.2 Agua	63
3.2.1.3 Biodiversidad	64
3.2.1.4 Recursos no renovables y contaminantes	65
3.2.2 Cálculo de la Huella Ecológica y Biocapacidad	66
3.2.2.1 Factores de rendimiento	73
3.2.2.2 Factores de equivalencia	74

3.2.3 Cálculo de la Huella Ecológica de un individuo	75
3.2.4 Cálculo de la Huella Ecológica de un grupo de personas	76
3.2.5 Cálculo de la Huella Ecológica en la producción de un bien o servicio	75
3.2.6 Cálculo de la Huella Ecológica de un consumidor	77
3.2.7 Tipos de uso de la tierra en la Huella Ecológica	78
3.2.7.1 Tierras de cultivo	78
3.2.7.2 Tierras de pastoreo	79
3.2.7.3 Zonas pesqueras (caladeros)	79
3.2.7.4 Zonas boscosas	80
3.2.7.5 Tierra construida	81
3.2.7.6 Huella de Carbono	81
<b>4 Huella de Carbono</b>	<b>82</b>
4.1 Introducción	82
4.1.1 Huella de Carbono y Huella Ecológica	85
4.2 Metodología	87
4.2.1 Protocolo de Gases de Efecto Invernadero	93
4.2.1.1 Determinación de los límites organizacionales y operacionales	95
4.2.1.2 Identificación y cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero	95
4.2.1.3 Reporte de emisiones de Gases de Efecto Invernadero	98
4.2.2 Publicly Available Specifications 2050	99
4.2.2.1 Fijación de objetivos	101

4.2.2.2 Cálculo de la Huella de Carbono	101
4.2.2.3 Perfilando resultados	103
<b>5 Conclusiones</b>	<b>105</b>
<b>6 Referencias</b>	<b>108</b>
<b>Anexos</b>	

# Lista de figuras

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
2.1	Representación esquemática de la HH de un consumidor o productor	14
2.2	Fases de una evaluación completa de HH	16
2.3	HH de un proceso como base para las otras Huellas Hídricas	17
2.4	HHA en el caso de reciclaje y reutilización de agua	19
2.5	HHA y HHV en relación con el balance hídrico de un área de captación	22
2.6	Procesos posteriores al riego	34
2.7	HH directa e indirecta en cada etapa de la cadena de suministro de un producto	35
2.8	Esquematización del sistema de producción	36
2.9	Ilustración de la última etapa del sistema de producción para elaborar producto "p"	37
2.10	Ámbito doméstico de la contabilidad del agua	43
2.11	Esquema de la contabilidad de la HH en la zona de captación	50
2.12	Elementos que conforman la HH de una empresa	52
3.1	Marco de contabilización de las cuentas nacionales de la HE	69
3.2	Representación esquemática para la evaluación del EQF	75
3.3	Esquematización de la demanda (directa e indirecta) de la biocapacidad	78
4.1	Elementos y vinculación entre HC y HE	86

4.2	Niveles de aplicación, marco metodológico y principales aplicaciones de la HC	93
4.3	Delimitación organizacional y operacional de una empresa	95
4.4	Alcances y emisiones a través de la cadena de valor	96
4.5	Pasos para calcular la Huella de Carbón con PAS 2050	102

# Lista de tablas

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1.1	Taxonomía de algunos de los principales indicadores ambientales y de desarrollo sostenible	5
2.1	Elementos que componen la HH	9
2.2	Explicación espacio-temporal en la contabilidad de la HH	13
2.3	Unidades que se expresan en la HH de acuerdo a su término	15
2.4	Niveles para la estimación de cargas de contaminación difusas	28
2.5	Fuentes de información para el cálculo de la HH de un cultivo	32
2.6	Algunos ejemplos del uso de los componentes de la HH de una empresa	53
3.1	Definición de desecho en la HE	59
3.2	Ejemplo de cómo disminuir la HE	60
3.3	Información de entrada para el cálculo de la HH y Biocapacidad	66
4.1	Distintas definiciones de Huella de Carbono	83
4.2	Iniciativas fundamentales a nivel mundial para la medición de la HC	88
4.3	Principales metodologías y herramientas para el cálculo de la HC	91
4.4	Utilidad de los inventarios de GEI en las metas empresariales	94
4.5	Factores de emisión respecto a materiales comúnmente empleados	98



4.6	Aplicación de PAS 2050 en los diferentes tipos de productos	100
47	Oportunidades más comunes de reducción de emisiones	104

# 1.- INTRODUCCIÓN

Escasez de agua debido a ríos, lagos y océanos contaminados y al mal uso que le damos a la que tenemos disponible; emisiones a la atmósfera de gases potencializando el efecto invernadero, paulatino adelgazamiento de la capa de ozono; destrucción de ecosistemas para poder obtener los recursos naturales que la sociedad demanda llegando a la sobreexplotación indiscriminada de los mismos. Estos son algunos problemas ambientales a los cuales se enfrenta actualmente el hombre. La degradación ambiental no sólo afecta a la calidad o a la estética, de la existencia humana, sino que también muestra potencial para disminuir las condiciones necesarias para la sostenibilidad de la vida (Mauritius Country Review, 2012).

Gran parte de este conflicto se debe al poco conocimiento ambiental con el que contamos, lo cual conlleva a tener la más mínima o nula percepción del daño que le estamos provocando a nuestro entorno. Resulta imperioso medir de alguna manera este daño que le estamos provocando al planeta y a sus recursos, trasladarlo a números significativos para tener una visión más concientizada de nuestros actos y de cómo éstos perjudican al medio ambiente.

No podemos dejar pasar el hecho de que cada vez es más común escuchar hablar sobre desastres ambientales, los cuales, en la mayoría de las veces, están presentes las acciones del hombre, las cuales juegan un papel trascendental en dichos acontecimientos, mientras que los que se pueden denominar de carácter natural, de forma indirecta o directa, la misma intervención humana no ha hecho más que intensificarlos y volverlos más catastróficos y destructivos. La relevancia actual sobre temas ambientales tiene su origen en la inminente preocupación por el agotamiento de los recursos naturales y sus consecuencias, no sólo a nivel regional, sino también a nivel global.

En promedio, una ciudad con millón de habitantes consume diariamente 625,000 m<sup>3</sup> de agua, 2,000 toneladas de alimentos y 9,500 toneladas de combustible; lo que genera 500,000 m<sup>3</sup> de agua residual, 2,000 toneladas de residuos sólidos y 950 toneladas de contaminantes atmosféricos; esto sin tomar en cuenta las actividades industriales y su tasa de crecimiento urbano (Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional 2009).

Sin duda, estos números tienen efecto sobre el ambiente; el actual sistema de desarrollo que ostenta la humanidad, basado en aumentar el consumo y una clara dependencia de los agónicos combustibles fósiles, aunada a una constante población humana en franco crecimiento y una deficiente gestión y gobernanza global de los recursos naturales (World Wildlife Fund, 2012), está llevando al planeta a niveles de insostenibilidad ambiental. Nuestro actual ritmo de vida consume recursos como si tuviéramos un planeta extra a nuestra disposición. Utilizamos alrededor de un 50 por ciento más de recursos de los que nuestro planeta puede proveer y, de seguir esta tendencia, esa cifra aumentará rápidamente, en 2030, incluso dos planetas no serán suficientes (World Wildlife Fund, 2012)

Es importante conocer y medir el nivel que estamos alcanzando ya que esto podrá sentar las bases para plantear alternativas satisfactorias dada la necesidad de llegar una relación desarrollo humano-medio ambiente equilibrada.

Actualmente existen indicadores que nos sirven como una herramienta de diagnóstico de sostenibilidad ambiental, proporcionándonos un modo de conocer cuál es el impacto del paso del ser humano por la tierra a través de sus actividades, uso y consumo de recursos proporcionados por el planeta. Entre los indicadores más importantes están la Huella Hídrica (HH) Huella Ecológica (HE) y Huella de Carbono (HC).

## **1.1.- Antecedentes**

Tanto el medio ambiente como los recursos naturales son considerados elementos indispensables para el desarrollo y bienestar de la sociedad en general. Es más común que exista mayor conciencia sobre la importancia de los bienes y servicios ambientales que proveen los ecosistemas naturales y de los efectos adversos que el deterioro ambiental y la pérdida de los recursos naturales ocasionan sobre la salud de la población, e incluso, sobre el desarrollo futuro de los países (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006).

Dentro del rubro ambiental se han desarrollado indicadores para comprender, detallar y analizar diversos fenómenos. Si bien, la utilización de indicadores ambientales se ha dispersado, no existe una única definición del término y éste cambia según la institución y los objetivos específicos que se persiguen. Una de estas definiciones, quizá la más conocida y aceptada, proviene de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que desde hace algún tiempo emplea un conjunto de indicadores como información base para llevar a cabo evaluaciones periódicas del desempeño ambiental de los diferentes países que conforman dicha organización.

La OCDE, define un indicador ambiental como un parámetro o valor derivado del mismo que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro mismo. La importancia de los indicadores radica en el uso que se les puede dar. A priori, deben informar a quienes toman decisiones, asistirlos a esclarecer un tema y descubrir las relaciones entre sus componentes, lo cual conduce a decisiones proporcionalmente mejor sustentadas. Igualmente son una excelente herramienta de información al público en general porque, llevados con una estrategia de comunicación eficiente, ilustran conceptos e información científica, lo cual conlleva al entendimiento de los temas y a que la sociedad tome un papel proactivo en la solución de las disyuntivas ambientales que nos aquejan (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011).

Los indicadores ambientales han sido utilizados a nivel internacional, nacional, regional, estatal y local para fines diversos, entre los que destacan: servir como herramientas para dar información sobre el estado del medio ambiente, evaluar el desempeño de políticas ambientales y comunicar los progresos en la búsqueda del desarrollo sostenible (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011). Sin embargo, para que los indicadores cumplan cabalmente con estas funciones es necesario que tengan ciertas características entre las que destacan las siguientes:

- a) Proporcionar una visión de las condiciones ambientales, presiones ambientales y respuestas de la sociedad y/o gobierno.
- b) Deben ser simples, fáciles de interpretar y capaces de mostrar las tendencias a través del tiempo.
- c) Responder a cambios en el ambiente y las actividades humanas relacionadas.
- d) Proporcionar una base de datos para las comparaciones internacionales (cuando sea necesario).
- e) Ser aplicables a escala nacional o regional, según sea el caso.
- f) Tener un valor con el cual puedan ser comparados (preferentemente).
- g) Estar bien fundamentados tanto teórica como científicamente.
- h) Estar basados en consensos internacionales.
- i) Ser capaces de interactuar con modelos económicos y/o de desarrollo, así como con sistemas de información.
- j) Estar razonablemente disponibles con una relación costo/beneficio.
- k) Estar bien documentados y gozar de calidad reconocida.
- l) Ser actualizados a intervalos regulares con procedimientos confiables.

Para facilitar el entendimiento de los indicadores, la tabla 1.1 muestra la posible taxonomía de éstos, presenta un esquema que pretende clasificar las iniciativas mundiales que se desarrollan sobre los indicadores tanto ambientales como de desarrollo sostenible.

Tabla 1.1 Taxonomía de algunos de los principales indicadores ambientales y de desarrollo sostenible

Enfoque	Enfoque sistémico		Enfoque conmensuralista	
Escala	Ambiental	Desarrollo sostenible	Monetizados	Índices
Mundial	Capital Natural (Naredo: Coste Energético de Reposición)		Value of World Ecosystem Services	Índice del Planeta Vivo (IPV, WWF)
	WWI: Vital Signs			
	WRI: World Resources			
Nacional	Colombia	Brasil	Capital Natural y Total, Riqueza Real y Ahorro Genuino (Banco Mundial)	Índice del Planeta Vivo (IPV, WWF), Índice de Bienestar Económico Sostenible (IBES), Índice de Sostenibilidad Ambiental (ISA), Huella Ecológica
	Venezuela	México		
	Costa Rica	Costa Rica		
	México	Chile	Indicadores provenientes del Sistema de Contabilidad Económica Ambiental Integrada (SCAEI), e.j. PIB neto de descapitalización ambiental, Gasto Ambiental, etc.).	
	Panamá	Argentina		
	República Dominicana	Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colombia		
	Canadá	Barbados		
	Nueva Zelandia	Canadá		
	Suecia	Reino Unido		
	Australia	Estados Unidos		
	España	España		
	Estados Unidos	Suecia		
Agencial	Indicadores Ambientales (Agencia Ambiental Europea)	Indicadores ILAC de DS (PNUMA y Foro de Ministros de Medio Ambiente ALC)		
	Indicadores Ambientales (OCDE)	IDS (Comisión de Desarrollo Sostenible) IDS Unión Europea OCDE (Indicadores de Desacoplamiento)		
Regional	Canadá	Chile		Huella Ecológica
		México-Estados Unidos (fronterizos)		
Local	Cuencas	Sustainable Seattle		Huella Ecológica
Sectorial o temático	Biodiversidad			
	Energía			
	Transporte			

Fuente: Quiroga-Martínez, 2007

## **1.2.- Justificación**

Las personas responsables de la toma de decisiones requieren de información oportuna, precisa y confiable sobre el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Los indicadores ambientales tienen la característica de convertirse en potenciales herramientas de gran importancia para la comunicación de información técnica y científica. También pueden ayudar a facilitar la difusión de esa información a diferentes grupos de usuarios y/o a la sociedad en su conjunto, lo que derivaría en transformar la información en acción (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2003).

Pocos países han logrado desarrollar con fuerza y estabilidad la institucionalidad de gestión ambiental, tampoco se tiene unidades especializadas en estadísticas e indicadores ambientales, con notables excepciones regionales. Ciertamente es que la mayoría de los países cuenta con sistemas de información ambiental, que comúnmente compilan y dispersan información ambiental documental y referencial lo cual es muy loable (Quiroga-Martínez, 2007), pero del desarrollo de información de los indicadores ambientales, no podemos decir lo mismo. A pesar de lo declarado y de lo avanzado en la práctica, aún persiste una insuficiente valoración del potencial que tienen los indicadores ambientales como herramientas en la toma de decisiones por parte de la mayoría de los gobiernos, en relación a otras prioridades en la agenda pública.

En base a lo anterior, resulta importante llevar a cabo una investigación literaria exhaustiva sobre los indicadores de HH, HE y HC. Contar con el conocimiento y enfoque de sus objetivos y metodologías empleadas es de gran ayuda ya que proveen criterios bien definidos al momento de realizar un estudio de este tipo. Esto nos ayudaría a aportar información científica de gran valor para facilitar la toma de decisiones y de acciones en apoyo de la gestión sostenible las cuales tendrán impacto directo en la forma como se definirá al hombre, su relación con la naturaleza y la pronta recuperación del medio ambiente en el cual estamos insertos.

### **1.3.- Hipótesis**

Estudiar en profundidad los indicadores de sostenibilidad ambiental, Huella Hídrica, Ecológica y de Carbono, puede ser útil para conocer su origen y comportamiento así como las metodologías y sus alcances existentes e incentivar a su aplicación dentro de la región, obteniendo de esta manera, información confiable y necesaria para ayudar a gestionar acciones en pro de la sostenibilidad que vayan de acuerdo a los índices actuales, lo que conllevaría a que el panorama reciente se vea mejorado, contribuyendo al fomento de una cultura de protección y preservación del medio ambiente.

### **1.4.- Objetivos**

#### **14.1.- Objetivo general**

Realizar un estudio íntegro de la literatura sobre los indicadores de sostenibilidad ambiental cuya trascendencia y ponderación los coloca como los más importantes en la actualidad.

#### **14.2.- Objetivos específicos**

- Llevar a cabo una investigación bibliográfica sobre los conceptos más recientes de los indicadores ambientales sobre Huella Hídrica, Huella Ecológica y Huella de Carbono.
- Estudiar cada uno de los indicadores aquí mencionados para analizar sus características principales.
- Si el indicador lo analiza, establecer en base a la información recabada, las metodologías comúnmente empleadas en sus diversas escalas más importantes (industrial, individual, nacional).
- Coadyuvar en el desarrollo y difusión de la información en materia ambiental.



## 2.- HUELLA HÍDRICA

### 2.1.- Introducción

Los seres humanos vivimos en un mundo de agua. Es el único planeta conocido que está cubierto por una capa acuosa líquida. Océanos, ríos, lagos, humedales, nubes, la mayor parte de sus rasgos superficiales están contruidos por agua. Sin embargo, a pesar de la abundancia global, los seres humanos estamos teniendo problemas de escasez de agua, cada vez más frecuentes, cada vez más intensos, cada vez más devastadores (Antón y Díaz, 2000).

La Huella Hídrica (HH) cuantifica el consumo de agua, tanto directo como indirecto, que utilizan los consumidores o productores en diferentes procesos. Este concepto nos trata de entregar todos los datos del proceso que involucre agua: "dónde", "cuándo" y "cuánta", se consume o contamina, considerando toda la cadena de suministro. El término de HH fue introducido por el profesor Arjen Hoekstra en 2002 con el fin de disponer de un indicador basado en el consumo del uso del agua que podría proporcionar información útil, además de los tradicionales indicadores de utilización de agua basados en producción-sector (Chapagain y Hoekstra, 2004).

En otras palabras la HH es el volumen de agua necesaria para la producción de los productos y servicios consumidos por los habitantes de un país ya sea industria o persona (Chapagain y Hoekstra, 2004). Este concepto incluye el agua requerida para la producción de los bienes exportados, que aunque no son consumidos internamente, pero sí son producidos dentro de la geografía nacional y, por tanto, consumen agua del país de procedencia (Hoekstra y Hung, 2002). La HH nos sirve como un indicador de uso de agua parte de un consumidor o productor.

Aldaya (2012) presenta en forma resumida los conceptos de la HH los cuales pueden fijarse la siguiente manera:

- a) La HH es un indicador del uso de agua que integra el uso directo e indirecto de la misma de un consumidor o productor.
- b) Se cuantifica en términos de volumen de agua consumida (evaporada o que no retorna) y/o contaminada por unidad de tiempo.
- c) Es un indicador geográfico y temporalmente explícito.
- d) Puede ser medida en diferentes escalas: para un proceso, producto, consumidor, grupo de consumidores o productor.

La HH se integra por tres componentes huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris, la tabla 2.1 muestra estos elementos así como su definición.

Tabla 2.1 Elementos que componen la HH

Huella hídrica	Elemento y definición
Volumen de agua dulce total utilizado para la producción de bienes o servicios que son consumidos por una persona o conjunto de consumidores entendiéndose por estos como una familia, comunidad, estado, nación, empresa u organización pública o privada.	<b>Huella hídrica azul</b> Volumen de uso consuntivo del agua proveniente de aguas superficiales y/o acuíferos, o de manera simple, es la cantidad agua dulce superficial o subterránea utilizada.
	<b>Huella hídrica verde</b> Volumen de agua de lluvia cuyo origen es la humedad del suelo, que se evapora o se consume, dicho de otra manera es volumen tomado del agua de lluvia acumulada en el suelo.
	<b>Huella hídrica gris</b> Volumen posible de agua que se requiere para diluir los contaminantes que se descargan a los cuerpos receptores de agua en la medida que no superen los límites máximos permisibles vigentes establecidos.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que otros indicadores ambientales, su escala de aplicación varía y puede realizarse para un individuo, grupos de personas, sector (Rodríguez-Casado et ál. 2008; Mekonnen y Hoekstra, 2011), producto o servicio (Aldaya y Hoekstra, 2009; Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2008), área (Aldaya y Llamas, 2008) o país (Van-Oel et al. 2009; Aldaya et al. 2009).

El precedente de la HH viene a partir del concepto de Agua Virtual (AV) que el profesor Allan definió por primera vez, a principios de la década de los noventa (1993, 1994), el cual lo describe como el agua "contenida" en un producto, entendiendo por tal, no solamente la cantidad física contenida en el mismo, sino la cantidad de agua que ha se ha requerido para generar dicho producto (Velázquez, 2009). El profesor John Anthony Allan, elaboró el concepto, como una manera de solucionar los problemas de escasez a través de la importación del agua que contienen los productos de cualquier sector. Así definida el AV se configuraba como indicador físico en términos de agua de la producción de un bien o servicio.

Aunque aparentemente el término se antojaba revolucionario, si lo aplicamos sobre productos agrícolas no es más que el concepto de necesidades hídricas de un cultivo que los agrónomos están utilizando desde hace tiempo. La potencialidad del concepto viene unida a dos factores: 1) el AV nos da información de los requerimientos de agua, no únicamente de los productos agrícolas, también de los demás bienes y servicios. De esta manera es posible hablar de la cantidad de agua (en metros cúbicos) que hay que usar para producir un kilo de trigo, un kilo de carne de res, una cerveza, etc. 2) Por otro lado, el AV llega a su máximo potencial cuando se la relaciona con el comercio, facilitando información de los flujos de AV entre países. Así, se puede hablar del AV exportada y el AV importada a través del agua "contenida" en los productos comercializados.

Velázquez (2009) asume que no es muy inteligente exportar bienes a países con problemas de escasez hídrica cuya producción ha sido necesaria consumir grandes cantidades de agua. De esta manera, el AV se va configurando como

un indicador que no solo nos proporciona información sobre los requerimientos de agua de la producción, sino que se podría utilizar para analizar los flujos comerciales en términos de agua.

Fue de esta idea como se concibió el concepto de HH, el cual nace en el año 2002 y se le adjudica al profesor holandés Arjen Hoekstra. Lo contempla como un parámetro alternativo de la utilización del agua y destaca la importancia del uso adecuado del vital líquido, hasta hoy en día infravalorado.

En vista de la importancia que ha venido tomando este tema, en 2008 la cooperación entre instituciones globales lleva a la creación de la Water Footprint Network (WFN), página electrónica encargada de difundir estudios realizados sobre el tema, y finalmente en 2011 se lanza un manual que ayuda a determinar la HH titulado "The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard", un documento que recoge un conjunto de metodologías para el cálculo de la HH con el fin de unificarlas y estandarizarlas.

Resulta imprescindible entregar información adecuada y fomentar el uso racional del agua a todos los consumidores, así como su conservación como un tema de seguridad nacional (Comisión Nacional del Agua, 1999).

Optimizar el uso de este recurso hídrico, disminuir los costos y tener una gestión sostenible para poder usar estos datos como un indicador de requerimientos de agua del "consumo" de bienes y servicios por una población (Velázquez, 2009). Estos son algunos puntos cruciales que hay que tener muy presente a la hora de profundizar en el tema. Lo importante no es el valor en sí que se le pueda dar a la HH, sino los impactos asociados que ésta pueda tener en diversas áreas, una vez que se haya realizado la medición.

## 2.2.- Metodología

Los datos que conciernen a la Huella Hídrica (HH) de los diferentes países han ido cambiando conforme se han ido desarrollando las metodologías de cálculo. Los primeros estudios estimaron el flujo de Agua Virtual (AV) de cada país, con actividad comercial de productos agrícolas y de los productos ganaderos (Chapagain y Hoekstra, 2004; Hoekstra y Hung, 2002).

La mayoría de los estudios realizados referentes a este tema se enfocan objetivamente al sector agrario por el motivo de que alrededor del 70% de los recursos hídricos se utilizan en esta área (Quintero *et al.*, 2010) y gran parte del problema se encuentra en los métodos de riego empleados por lo que hay que tener en cuenta que cuando se es suministrada agua en cantidades adecuadas y constantes a una cierta región se pueden obtener resultados favorables en este rubro (García y Briones, 2007).

Los estudios de HH pueden tener diversos propósitos y pueden ser aplicados en diferentes contextos. Cada propósito requiere de su propio alcance de análisis por eso es importante empezar por especificar en cual huella estamos interesados:

- a) HH de una etapa del proceso
- b) HH de un producto
- c) HH de un consumidor
- d) HH de un grupo de consumidores (de un país; de un municipio, provincia u otra unidad administrativa; de consumidores de un área de captación o cuenca)
- e) HH dentro de un área geográficamente delimitada (de un país; de un municipio, provincia u otra unidad administrativa; de consumidores de un área de captación o cuenca)
- f) HH de una empresa
- g) HH de un sector empresarial
- h) HH de la humanidad en su totalidad

La evaluación de la HH puede realizarse en tres diferentes niveles espacio-temporales (Hoekstra *et al.*, 2011), planteadas en la tabla 2.2, En el Nivel A, el más bajo en cuanto a detalle se refiere, la HH se evalúa partiendo de la información disponible de la HH mundial promedio. En el Nivel B, la HH es evaluada basándose en el promedio nacional o regional o bien en la captación de datos específicos de HH de una base de datos geográficamente explícita disponible. El Nivel C, la cuenta de HH se encuentra geográfica y temporalmente explícita, basada en datos precisos sobre las entradas utilizadas y las fuentes precisas de esas entradas.

Tabla 2.2 Explicación espacio-temporal en la contabilidad de la HH

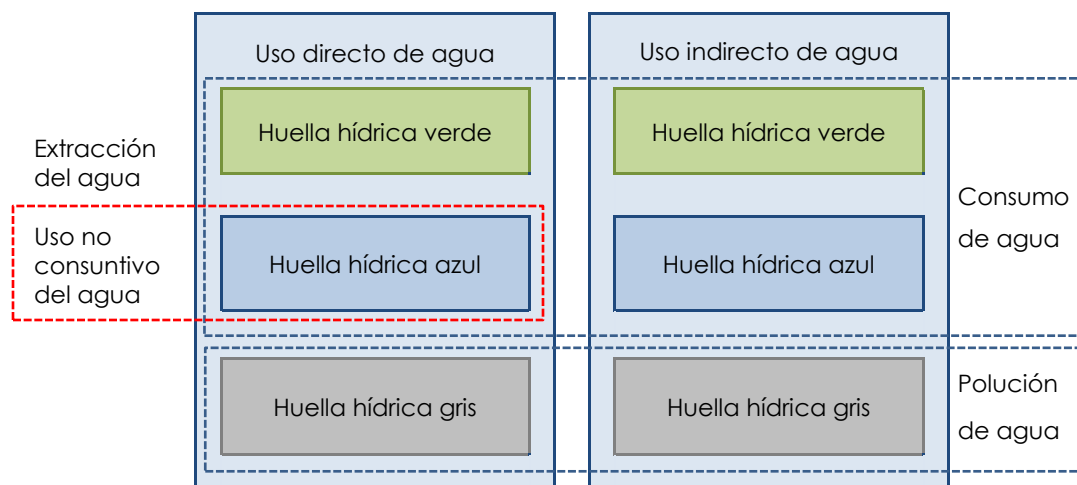
Nivel	Explicación espacial	Explicación temporal	Fuente de los datos requeridos en el uso del agua	Uso común de las cuentas
A	Promedio mundial	Anual	La literatura y bases de datos disponibles sobre el consumo común de agua y la contaminación por producto o proceso.	Sensibilización; breve definición de los componentes que más contribuyen a la HH global; desarrollo de las proyecciones globales de consumo de agua.
B	Nacional, regional o captación específica	Anual o mensual	Como el anterior, pero el uso a nivel nacional, regional o de captación de datos específicos.	Leve identificación espacial de la difusión y variabilidad; base de conocimientos para la identificación de puntos esenciales y las decisiones de asignación de agua.
C	Captación pequeña o campo específico	Mensual o diario	Los datos empíricos o (si no directamente medibles) mejores estimaciones sobre el consumo de agua y la contaminación, especificados por ubicación y durante el año.	Base de conocimiento para llevar a cabo una evaluación de la de la HH; formulación de una estrategia para reducir la HH y los impactos locales asociados.

Fuente: Modificado de Hoekstra *et al.*, 2011.

La importancia de un estándar compartido sobre definiciones y métodos de medición es crucial dado el rápido crecimiento de intereses entre las compañías y gobiernos sobre la HH como base para formular políticas y estrategias sostenibles para el agua. Partiendo de esta conjetura la Water Footprint Network (WFN) lanzó en 2011 un documento denominado "The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard" el cual pretende estandarizar la metodología para el cálculo de la HH (WFN, 2008). La metodología descrita a continuación se encuentra basada íntegramente en este manual con ligeras aportaciones de Aldaya (2012).

La HH se establece como un indicador de uso del agua la cual difiere de las mediciones clásicas de extracción del agua en tres apartados. La figura 2.1 es la representación esquemática de los componentes de la HH de un consumidor o productor. Muestra como la parte no consuntiva de la extracción del agua (flujo de retorno) no forma parte de la HH y que, contrario a la medición del agua extraída, la HH incluye agua verde y agua gris así como el componente de uso de agua directo o indirecto.

Figura 2.1 Representación esquemática de la HH de un consumidor o productor



Fuente: Adaptada de Aldaya, 2012.

La HH se encuentra expresada en términos de volumen de agua por unidad de producto o como un volumen de agua por unidad de tiempo. La tabla 2.3 describe las unidades empleadas según la HH en la cual estamos interesados en evaluar.

Tabla 2.3 Unidades que se expresan en la HH de acuerdo a su término

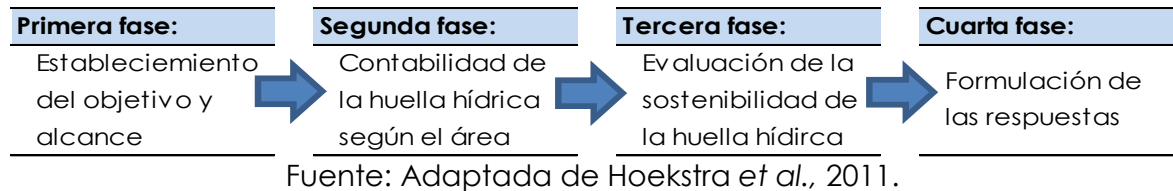
Término	Descripción de la(s) unidad(es)
HH de un proceso	Se expresa como el volumen de agua por unidad de tiempo. Cuando es dividida sobre la cantidad de producto que resulta del proceso (unidades de producto por unidad de tiempo), también puede ser expresada como volumen de agua por unidad de producto.
HH de un producto	Es siempre expresada como el volumen de agua por unidad de producto. Ejemplos: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen de agua por unidad de masa (para productos donde el peso es un buen indicador de la cantidad)</li> <li>- Volumen de agua por unidad de dinero (para productos en los que el valor dice más que el peso)</li> <li>- Volumen de agua por unidad (para los productos que se cuentan por pieza en lugar de peso)</li> <li>- Volumen de agua por unidad de energía (kcal por productos alimenticios, o joule por electricidad o combustibles)</li> </ul>
HH de un consumidor o empresa/comercio	Se expresa como el volumen de agua por unidad de tiempo. Puede ser expresada como volumen de agua por unidad monetaria cuando la HH por unidad de tiempo se divide por el ingreso (para los consumidores) o rotación (para las empresas). La HH de una comunidad de consumidores puede ser expresada en términos de volumen de agua por unidad de tiempo por habitante.
HH de un área geográficamente delimitada	Se expresa como el volumen de agua por unidad de tiempo. Se puede expresar en términos de volumen de agua por unidad monetaria cuando se divide sobre ingreso en la zona.

Fuente: Modificado de Hoekstra *et al.*, 2011.



Una evaluación total de HH consiste en cuatro diferentes fases ilustradas en la figura 2.2.

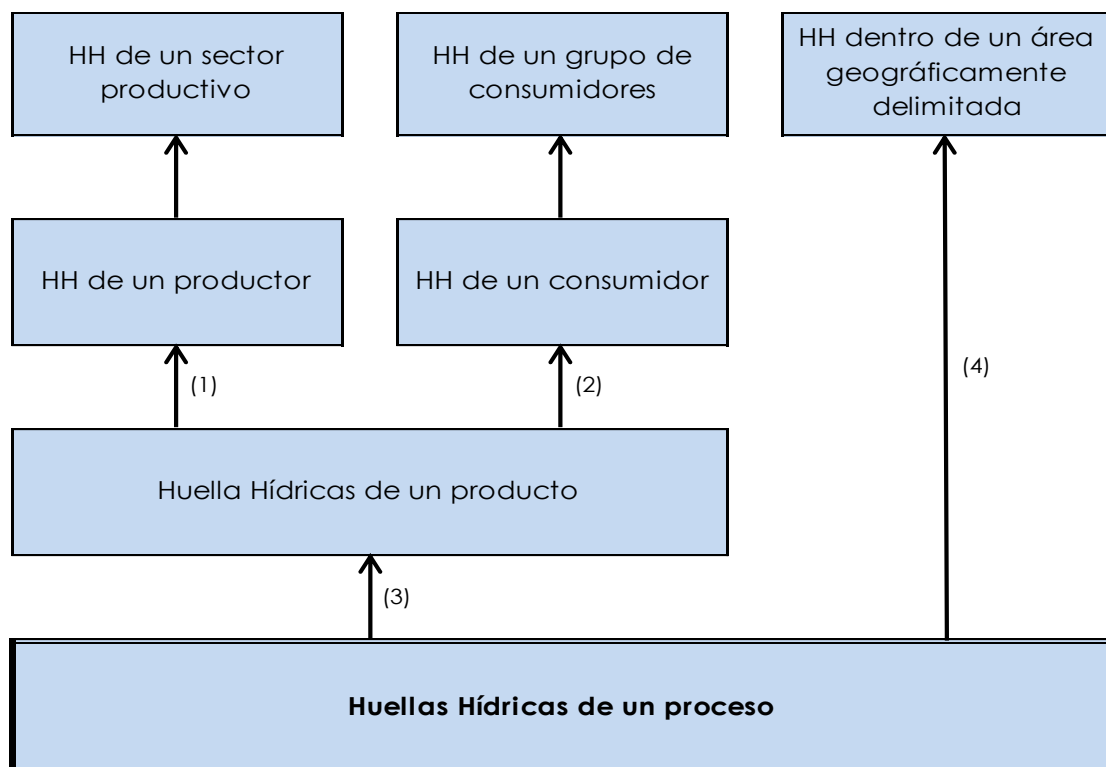
Figura 2.2 Fases de una evaluación completa de HH



### 2.2.1- Huella Hídrica de una etapa de proceso

La Huella Hídrica (HH) de una sola etapa de proceso es la referencia básica para lograr llevar a cabo un estudio integral de HH (Figura 2.3). De ahí radica la importancia de su entendimiento, aunque en ocasiones resulta poco viable o menos práctico realizar este paso según sus diferentes alcances, ya se verá condicionado de acuerdo a nuestros intereses, finalidad de la evaluación, posibilidades económicas, recursos humanos, tiempo, entre otros.

Figura 2.3 HH de un proceso como base para las otras Huellas Hídricas



(1) Agregar huellas del producto de todos los elaborados

(2) Agregar huellas del producto de todos los consumidos

(3) Agregar huellas del proceso de cada uno de ellos de un sistema de producción

(4) Agregar huellas del proceso de cada uno de ellos que tengan injerencia en su contabilidad dentro de la zona establecida

Fuente: Modificado de Hoekstra *et al.*, 2011.

### 2.2.1.1- Huella Hídrica Azul

La HH Azul (HHA) es un indicador del uso consuntivo de la denominada agua azul, es decir, el agua dulce superficial o subterránea que utilizamos y por lo general es el componente más importante. El término uso consuntivo del agua se puede referir a uno de los siguientes cuatro casos:

1. Agua que es evaporada;
2. Agua propiamente incorporada en un producto;

3. Agua que no vuelve a la misma cuenca hidrográfica de origen, por ejemplo, que retorna a otra zona de captación o al mar;
4. Agua que no vuelve en el mismo período, por ejemplo, si se extrae en un periodo de escasez y regresa en un período de lluvia.

Teniendo en cuenta esto, la HHA de la etapa de un proceso ( $WF_{proc,blue}$ ), se calcula mediante la fórmula 2.1:

$$WF_{proc,blue} = BWE + BWI + LostReturnflow \quad 2.1$$

Dónde:

$BWE$  = Evaporación de agua azul (vol/tiempo)

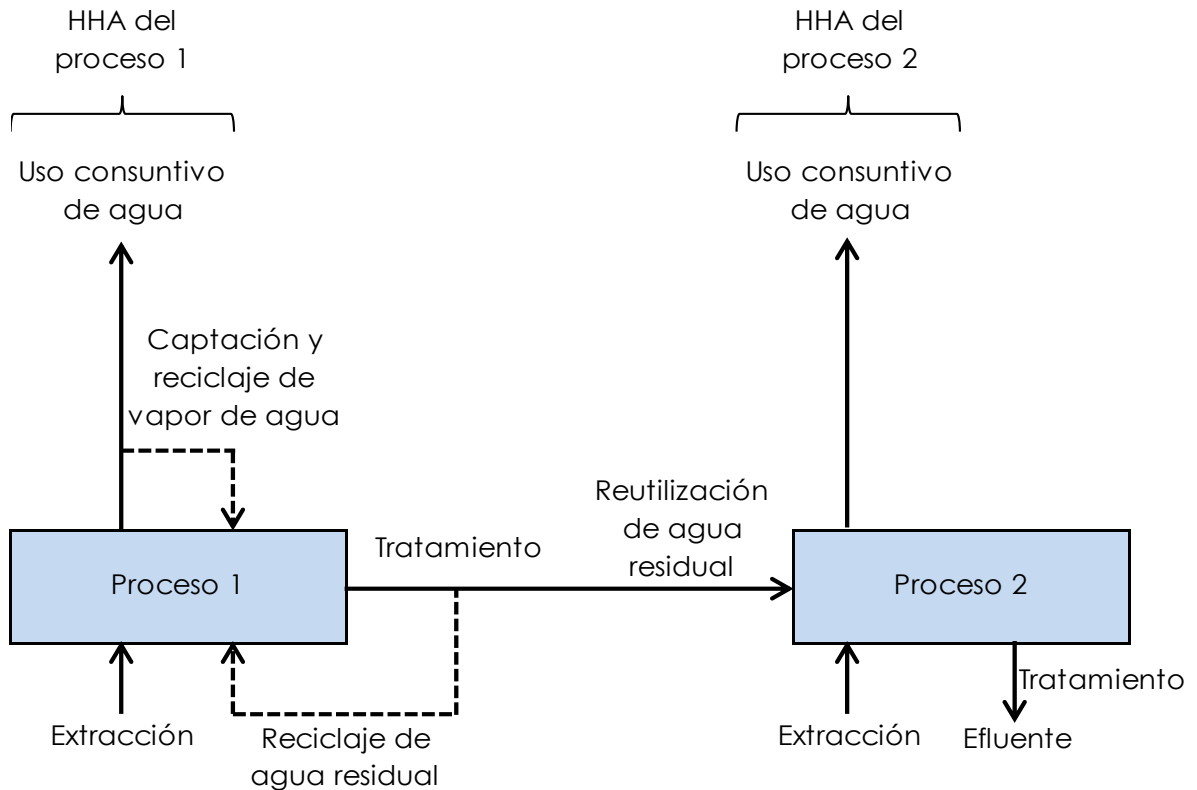
$BWI$  = Incorporación de agua azul (vol/tiempo)

$LostReturnflow$  = Flujo de retorno no reutilizable (vol/tiempo)

El último componente ( $LostReturnflow$ ) hace referencia a la parte del flujo de retorno que no se encuentra disponible para su reutilización dentro de la misma zona de captación en el mismo período de extracción (vol/tiempo), debido a que regresa a otra área de captación distinta (o es descargada en el mar) o porque regresa en otro período de tiempo.

El reciclaje de agua lo definiremos específicamente como el reuso *in situ* del líquido para el mismo propósito con el que fue concebido mientras que la reutilización de agua como el reuso de la misma para cualquier otra necesidad. En el primer concepto hace distinción entre el reciclaje de agua residual (tratada) y evaporada (vapor condensado). Estos dos conceptos se muestran ejemplificados en la figura 2.4.

Figura 2.4 HHA en el caso de reciclaje y reutilización de agua



Fuente: Adaptada de Hoekstra *et al.*, 2011

Un aspecto importante a tener en cuenta son las fuentes de datos para realizar el cálculo de la HHA en sus diferentes procesos, entre estas destacan las siguientes:

- a) Procesos industriales: Cada componente de la HHA de un proceso puede ser medido directa o indirectamente. Generalmente se conoce la cantidad de agua que se agrega al producto para llegar a convertirse parte del mismo. Por lo regular no se mide directamente cuánta agua se evapora durante el almacenamiento, transporte, procesamiento y disposición, sino que se puede deducir de la diferencia entre la extracción y los volúmenes de disposición final.

Preferentemente, se puede confiar en las bases de datos que contienen datos típicos sobre el uso consuntivo del agua para varios tipos de procesos

de fabricación. Éstas, sin embargo, son escasas y por lo general contienen datos sobre la extracción de agua y no sobre el uso del agua consuntiva. Además, estas bases de datos carecen de información adecuada y contienen cifras sobre el uso del agua por sector industrial (refinerías de azúcar, fábricas textiles, fábricas de papel, etc.) y no por el proceso de fabricación. Existen dos compendios ricos en información Gleick, 1993 y Van der Leeden *et al.*, 1990 (Hoekstra *et al.*, 2011), pero ambos se enfocan en Estados Unidos y están limitados principalmente a referencias sobre la extracción de agua. Las mejores fuentes de consumo de agua azul en los procesos de fabricación son los propios fabricantes o las organizaciones interprofesionales regionales o mundiales.

- b) Procesos agrícolas: Las estadísticas disponibles sobre el uso del agua azul en el sector agrícola, típicamente muestran sólo las extracciones de agua total para la irrigación, y no para el uso consuntivo de agua azul. Medir la evapotranspiración del agua de un campo resulta un tanto complicado. Esto incluso aun cuando este fenómeno haya sido medido, habría que estimar qué parte del total se refiere al agua azul. Por ende se confiará en modelos de balance de agua que utilicen información sobre el clima, suelo, características de cultivo y de irrigación actual como datos de entrada.

En la página web de la Water Footprint Network ([www.waterfootprint.org](http://www.waterfootprint.org)) los datos geográficamente explícitos sobre la HH de los cultivos en crecimiento están disponibles para los más importantes del mundo. Este paquete de información se puede utilizar para la contabilidad de la HH en el Nivel B. Para la contabilidad correspondiente al Nivel C, habrá que aplicar un modelo de balance hídrico adecuado en sí mismo, junto con los datos locales específicos de entrada.

### 2.2.1.2- Huella Hídrica Verde

La Huella Hídrica Verde (HHV) es el volumen de agua proveniente de lluvia consumida durante el proceso de producción, la cual no escurre o recarga aguas subterráneas pero es almacenada en el suelo o permanece temporalmente sobre él o sobre la vegetación la cual eventualmente se evapora o sea transpirada por medio de las plantas. Este hecho es particularmente relevante para los productos agrícolas y forestales (productos a base de cultivos o de madera), donde se refiere al total de la evapotranspiración del agua de lluvia de campos y plantaciones (Figura 2.5) agregando el agua incorporada al producto cosechado o de madera. Por lo tanto la HHV ( $WF_{proc,green}$ ) de una etapa del proceso se puede calcular mediante la fórmula 2.2:

$$WF_{proc,green} = GWE + GWI \quad 2.2$$

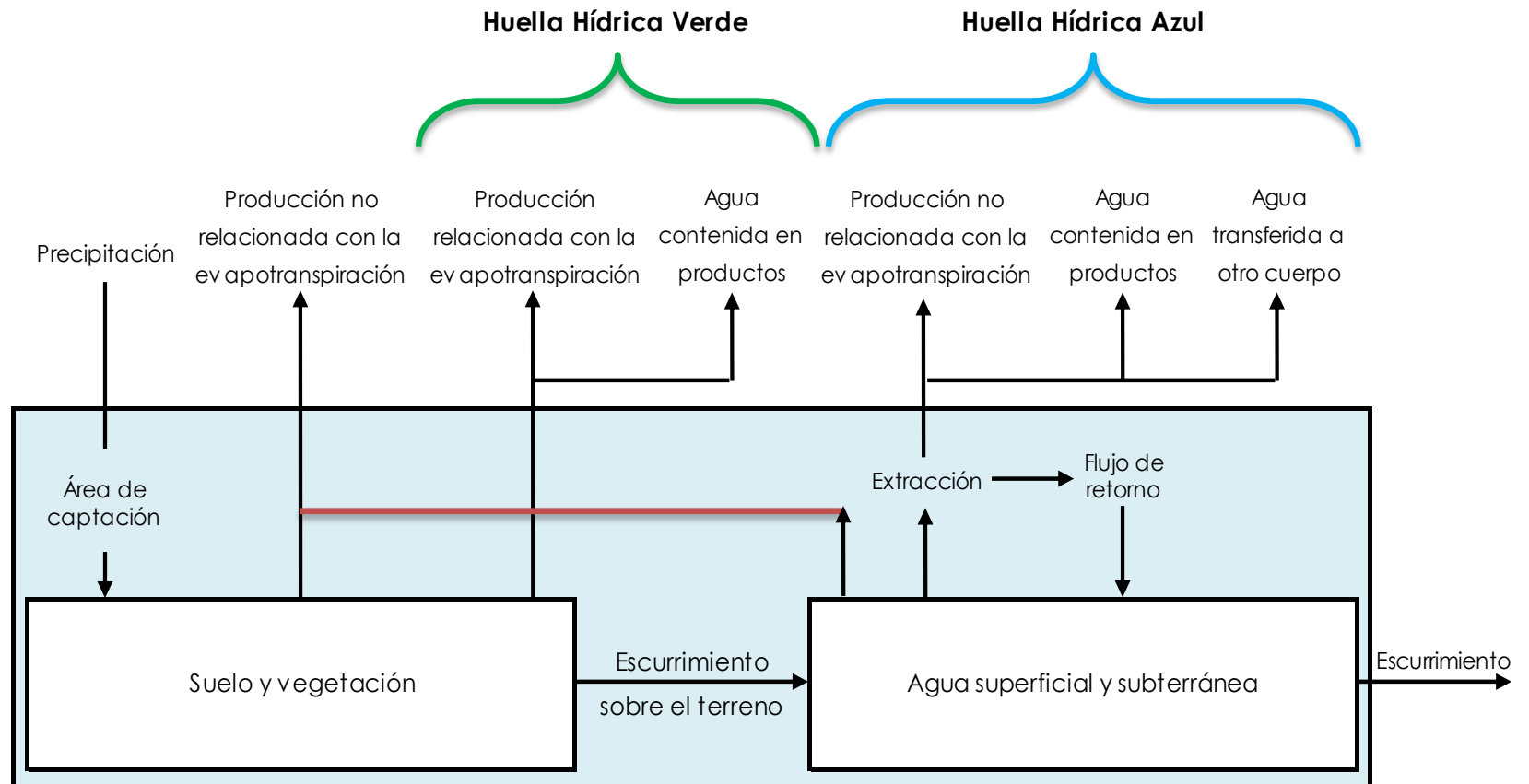
Dónde:

$GWE$  = Evaporación de agua verde (vol/tiempo)

$GWI$  = Incorporación de agua verde (vol/tiempo)

El consumo de agua verde dentro del sector agrícola también puede ser evaluado mediante un conjunto de fórmulas empíricas o con un modelo adecuado de cultivo que nos permita la estimación de la evapotranspiración en base a los datos de entrada de las características del clima, el suelo y cultivos en estudio.

Figura 2.5 HHA y HHV en relación con el balance hídrico de un área de captación



Fuente: Adaptada de Hoekstra *et al.*, 2011

### 2.2.1.3- Huella Hídrica Gris

La Huella Hídrica Gris (HHG) de una etapa del proceso funge como un indicador del grado de contaminación del volumen agua dulce que se puede asociar con la fase de transformación. El concepto HHG ha incrementado su interés a partir del reconocimiento de la cantidad de agua que se contamina dada la necesidad de diluir los contaminantes remanentes del proceso de tal forma que éstos se vuelvan inofensivos. Puede ser expresada en términos del volumen de agua.

La HHG ( $WF_{proc, grey}$ ) se calcula mediante la aplicación de la fórmula 2.3:

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}} \quad 2.3$$

Dónde:

$L$  = Carga contaminante (masa/tiempo)

$c_{max}$  = Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

$c_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo receptor de agua (masa/volumen)

La  $c_{nat}$  se refiere a la concentración que se produciría en el cuerpo de agua si no hubiera intervención humana en la zona de captación. Para las sustancias artificiales que no se producen naturalmente en el agua,  $c_{nat} = 0$ . Cuando las concentraciones naturales no son conocidas con precisión, pero se estima que éstas sean bajas, por simplicidad se puede suponer  $c_{nat} = 0$ . Esto, sin embargo, dará como resultado una HHG subestimada cuando  $c_{nat}$  en realidad no es equivalente a cero.

La  $c_{nat}$  se utiliza como referencia y no como la concentración real en el cuerpo receptor de agua puesto que la HHG es un indicador de la capacidad apropiada de asimilación. Ésta depende de la diferencia entre el máximo admisible y la concentración natural de una sustancia. Si se compara la concentración máxima permitida con la concentración real del elemento, se



buscaría en la capacidad de asimilación restante, que cambia constantemente, una función del nivel real de contaminación en un momento determinado.

El cálculo de la HHG se lleva a cabo utilizando las normas vigentes de calidad de agua para el cuerpo receptor de agua dulce, (normas con respecto a las concentraciones máximas permisibles de descarga). La razón es que la HHG tiene como objetivo mostrar el volumen requerido de agua para asimilar constituyentes químicos.

Para una determinada sustancia, el estándar de calidad de agua puede variar de un cuerpo de agua a otro. Además, la concentración natural también puede diferir según el lugar. Como resultado, una carga de contaminante dada puede derivar en una HHG con diferentes resultados según el lugar. La razón de esto yace en que el volumen de agua necesaria para la asimilación de una cierta carga contaminante será diferente, dependiendo de la diferencia entre el máximo admisible y la concentración natural.

Se debe considerar la diferencia entre normas, por ejemplo, las del agua subterránea a menudo se basan en las necesidades de agua potable, mientras que las de límites máximos permisibles, en las aguas superficiales, son comúnmente determinadas por consideraciones ecológicas. Por tanto, cabe proponer calcular la HHG por separado para los sistemas de aguas superficiales y subterráneas.

Una HHG mayor que cero no implica automáticamente que las normas de calidad del agua sean sobrepasadas, sólo muestra la parte de la capacidad de asimilación que ya se ha consumido. En este aspecto podemos encontrar los casos siguientes:

1. Siempre que la HHG calculada sea menor que la existente en el caudal del río o flujo de agua subterránea, significa que aún hay agua suficiente para diluir los contaminantes a una concentración por debajo de la norma.
2. Cuando la HHG calculada sea igual a la del flujo de agua, entonces, la concentración resultante será exactamente a la de la norma.

3. Cuando el efluente contiene una carga muy alta de productos químicos, puede ocurrir que la HHG calculada supere la existente en el caudal del río o flujo de agua subterránea. En este caso, la contaminación va más allá de la capacidad de asimilación del cuerpo receptor de agua. Esto no muestra el volumen de agua contaminada (porque no sería capaz de contaminar un volumen mayor que la existente). En su lugar, la HHG es un indicador de la gravedad de la contaminación del agua, expresada en términos del volumen de agua dulce necesaria para asimilar la carga existente de contaminantes.

El enfoque adoptado en la evaluación de la HHG es el mismo que el denominado enfoque de carga crítica ( $L_{crit}$ , en masa/tiempo). En ambos casos, la base radica en que el espacio para la captación de residuos de un cuerpo de agua es limitado por la diferencia entre la concentración máxima y la natural. La  $L_{crit}$  alude a la situación donde el espacio para la captación de residuos ha sido completamente consumido. En la  $L_{crit}$ , la HHG será igual al flujo de agua disponible, que entonces se requiere para diluir en su totalidad los productos químicos a concentraciones aceptables.

Cuando la carga en un cuerpo de agua que fluye alcanza una cierta  $L_{crit}$ , la HHG será igual a la del escurrimiento, lo que significa que la escorrentía total es apropiada para la asimilación de desechos. La  $L_{crit}$  es la carga de contaminantes que consumirá completamente la capacidad de asimilación del cuerpo receptor de agua y se logra calcular con la fórmula 2.4:

$$L_{crit} = R \times (c_{max} - c_{nat}) \quad 2.4$$

Dónde:

$R$  = Escurrimiento del cuerpo de agua (vol/tiempo)

$c_{max}$  = Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

$c_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo receptor de agua (masa/volumen)

El concepto de carga crítica es similar a la Carga Total Máxima Diaria (TMDL, por sus siglas en inglés) desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. TMDL es un cálculo de la cantidad máxima de un contaminante que un cuerpo de agua puede recibir y que a pesar de contaminarse, con seguridad aún cumplen con los estándares de calidad del agua (Environmental Protection Agency, 2012).

En aquellos casos de fuentes puntuales de contaminación de agua, cuando los productos químicos son liberados de forma directa a un cuerpo de agua superficial (disposición de aguas residuales), la carga pueda ser estimada mediante la evaluación del volumen del efluente y la concentración del químico en el mismo (fórmula 2.5).

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}} = \frac{Effl \times c_{effl} - Abstr \times c_{act}}{c_{max} - c_{nat}} \quad 2.5$$

Dónde:

$L$  = Carga contaminante (masa/tiempo)

$c_{max}$  = Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

$c_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo receptor de agua (masa/volumen)

$Effl$  = Volumen de efluente (vol/tiempo)

$c_{effl}$  = Concentración del contaminante en el efluente (masa/volumen)

$Abstr$  = Volumen de agua extraída (vol/tiempo)

$c_{act}$  = Concentración real del agua consumida (masa/volumen)

Bajo la mayoría de las circunstancias, la cantidad de productos químicos vertidos en un cuerpo de agua ( $Effl \times c_{effl}$ ) será igual o mayor que la cantidad de químicos extraídos ( $Abstr \times c_{act}$ ), por lo que la carga es positiva. En eventos excepcionales ( $c_{effl} < c_{act}$  o  $Effl < Abstr$ ), se podría calcular una carga negativa, la cual tiene que dejarse de lado para las cuentas de la HH (HH = 0).

Cuando no existe un uso consuntivo del agua, en otras palabras, cuando el volumen de efluente es igual al volumen de extracción la fórmula 2.5 se ve simplificada quedando de la siguiente manera (fórmula 2.6):

$$WF_{proc, grey} = \frac{c_{effl} - c_{act}}{c_{max} - c_{nat}} \times Effl \quad 2.6$$

Dónde:

$c_{effl}$  = Concentración del contaminante en el efluente (masa/volumen)

$c_{act}$  = Concentración real del agua consumida (masa/volumen)

$c_{max}$  = Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

$c_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo receptor de agua

$Effl$  = Volumen de efluente (vol/tiempo)

Para la contaminación térmica, es posible aplicar un enfoque similar al de por sustancias químicas. La HHG ahora es calculada con la fórmula 2.7:

$$WF_{proc, grey} = \frac{T_{effl} - T_{act}}{T_{max} - T_{nat}} \times Effl \quad 2.7$$

Dónde:

$T_{effl}$  = Temperatura de un flujo de efluente (°C)

$T_{act}$  = Temperatura del cuerpo receptor (°C)

$T_{max} - T_{nat}$  = Aumento de temperatura máximo aceptable (°C)

$Effl$  = Volumen de efluente (vol/tiempo):

En el otro extremo nos encontramos el caso contrario en donde las fuentes de contaminación de aguas son difusas y cuya estimación de carga química contaminante no es tan sencilla como en el caso de las fuentes puntuales, puesto que es difícil conocer la cantidad exacta de químicos que entran en contacto con el agua. Para este caso, una forma de estimar la HHG sería la aplicación de modelos. El más simple de ellos consiste en asumir que una cierta fracción fija de los productos químicos aplicados finalmente alcanza el agua superficial o subterránea, esto se representa con la fórmula 2.8:

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}} = \frac{\alpha - Appl}{c_{max} - c_{nat}} \quad 2.8$$

Dónde:

$L$  = Carga contaminante (masa/tiempo)

$c_{max}$  = Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

$c_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo receptor de agua (masa/volumen)

$\alpha$  = Factor representativo de la fracción de sustancias químicas para la lixiviación-esorrentía (adimensional)

$Appl$  = Aplicación de productos químicos sobre o en el suelo en un determinado proceso (masa/tiempo)

Para entender más a fondo la estimación de las cargas de contaminación difusas se plantea un enfoque de tres niveles (tabla 2.4) similar a la del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Hoekstra *et al.*, 2011). De nivel 1 a 3, aumenta la precisión, pero la viabilidad disminuye.

Tabla 2.4 Niveles para la estimación de cargas de contaminación difusas

Nivel	Enfoque
1	Utiliza una fracción fija para convertir los datos sobre la cantidad de productos químicos aplicados al suelo a una cantidad estimada de productos químicos que entran en el sistema de agua subterránea o superficial. La fracción se deriva de la literatura existente y puede depender de la sustancia química considerada. Esta estimación de Nivel 1 será suficiente como primera estimación aproximada pero obviamente excluye los factores pertinentes, tales como el tipo de suelo, las prácticas agrícolas, la hidrología del suelo y la interacción entre diferentes productos químicos en el suelo.

Tabla 2.4 Continuación

2	Aplica enfoques de modelos estandarizados y simplificados (derivados de aquellos ampliamente aceptados y validados), que pueden ser utilizados en base a datos ampliamente disponibles (equilibrio de nutrientes agrícolas, datos de pérdida de suelo, hidrológicos básicos, petrológicos e información hidromorfológica).
3	Emplea técnicas sofisticadas de modelado (dado que los recursos disponibles lo permitan y que el tema elegido lo requiera). Su complejidad a menudo los hace inadecuados para su uso en el modelado Nivel 3 de cargas difusas de contaminación. Sin embargo, los modelos empíricos validados impulsados por la información sobre las prácticas agrícolas, están actualmente disponibles. Los estudios de Nivel 3 deberían servir para perfeccionar los enfoques de Nivel 2.

Fuente: Modificada de Hoekstra *et al.*, 2011

### 2.2.2- Huella Hídrica Verde, Azul y Gris de un cultivo o árbol

Diversos productos contienen ingredientes provenientes de la agricultura o silvicultura. Los cultivos son utilizados para alimentos, fibras, combustibles, aceites, cosméticos y demás. La madera de los árboles y arbustos se usa para muebles, papel y combustible. Ya que estos dos sectores son los que más volumen de agua consumen, los productos cuya procedencia sea alguna de estos dos rubros en sus sistemas de producción, siempre tendrán un Huella Hídrica (HH) considerablemente mayor a otros de diferente origen.

El método es aplicable a los cultivos anuales y perennes, donde los árboles se pueden considerar un cultivo perenne. La HH total del proceso de cultivos o árboles ( $WF_{proc}$ ) se determina con la fórmula 2.9:

$$WF_{proc} = WF_{proc,green} + WF_{proc,blue} + WF_{proc,grey} \quad 2.9$$

Dónde:

$WF_{proc,green}$  = Huella Hídrica Verde de la etapa de un proceso

$WF_{proc,blue}$  = Huella Hídrica Azul de la etapa de un proceso

$WF_{proc,grey}$  = Huella Hídrica Gris de la etapa de un proceso

Comúnmente expresaremos la HH en la agricultura o silvicultura en términos de m<sup>3</sup>/ha, lo cual es equivalente a L/kg.

Para este tema, el primer componente, Huella Hídrica Verde (HHV) de la etapa de un proceso ( $WF_{proc,green}$ ), se determina mediante la fórmula 2.10:

$$WF_{proc,green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad 2.10$$

Dónde:

$CWU_{green}$  = Componente verde en el uso de agua en los cultivos (m<sup>3</sup>/ha)

$Y$  = Producción del cultivo (ton/ha)

De forma similar obtenemos nuestro segundo componente, Huella Hídrica Azul (HHA) de la etapa de un proceso ( $WF_{proc,blue}$ ), determinado mediante la fórmula 2.11:

$$WF_{proc,blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad 2.11$$

Dónde:

$CWU_{blue}$  = Componente azul en el uso de agua en los cultivos (m<sup>3</sup>/ha)

$Y$  = Producción del cultivo (ton/ha)

Finalmente para obtener nuestro último componente, Huella Hídrica Gris (HHG) de la etapa de un proceso ( $WF_{proc,grey}$ ), emplearemos la fórmula 2.12. Los contaminantes que atañen a este elemento generalmente consisten en fertilizantes, pesticidas e insecticidas.

$$WF_{proc,grey} = \frac{(\alpha \times AR)/(c_{max} - c_{nat})}{Y} \quad 2.12$$

Dónde:

$\alpha$  = Factor representativo de la fracción de sustancias químicas para la lixiviación-esorrentía (adimensional)

$AR$  = Tasa de aplicación de sustancias químicas al campo (kg/ha)

$C_{max}$  = Concentración máxima aceptable (masa/volumen)

$C_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo receptor de agua (masa/volumen)

$Y$  = Producción del cultivo (ton/ha)

El elemento  $CWU_{green}$  (fórmula 2.13) y  $CWU_{blue}$  (fórmula 2.14) son calculados mediante la acumulación de evapotranspiración diaria ( $ET$ , en mm/día) durante el periodo completo de crecimiento del cultivo:

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} \quad 2.13$$

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \quad 2.14$$

El factor 10x se destina a convertir profundidades de agua (mm) a volúmenes de agua por superficie de tierra (m<sup>3</sup>/ha); la sumatoria correspondiente se lleva a cabo durante el período que comprende desde primer día de siembra ( $d=1$ ) hasta el día final de la cosecha,  $lgp$  (duración del período de crecimiento, en días).

Para la estimación de la HHG, HHA y HHG de un cultivo requiere un gran número de fuentes de datos (tabla 2.5). Siempre es preferible encontrar información local relacionada con la ubicación del campo de cultivo. En muchos casos se dificulta en demasía obtener datos específicos de la ubicación dado el objetivo de la evaluación.

Si el propósito del estudio permite una estimación aproximada, se puede decidir trabajar con datos de localidades cercanas o con los promedios regionales o nacionales que pueden estar más fácilmente disponibles a través de órganos especializados.



Tabla 2.5 Fuentes de información para el cálculo de la HH de un cultivo

Rubro	Descripción	Fuente(s)
Clima	El cálculo debe hacerse utilizando los datos climáticos de la(s) estación(es) meteorológica(s) más cercana(s) y más representativa(s), ubicado cerca del campo de cultivo correspondiente dentro o cerca de la región productora del cultivo considerado.	CLIMWAT 2.0: proporciona datos climáticos necesarios en el formato apropiado requerido por el modelo CROPWAT 8.0. LocClim 1.1: da estimaciones de las condiciones climáticas promedias en los lugares para los cuales no se dispone de observaciones. El National Climatic Data Centre of US (NCDC) proporciona diariamente datos climáticos de un gran número de estaciones a nivel mundial. FAO ofrece a través de su sitio web GeoNetwork la precipitación media a largo plazo y la evapotranspiración de referencia.
Parámetros de cultivo	Los coeficientes y patrón de cultivo (fechas de siembra y cosecha) pueden ser tomados los datos locales. La variedad y el período adecuado para un determinado tipo de cultivos dependen en gran medida del clima y de muchos otros factores (las costumbres locales, las tradiciones, la estructura social, las normas y políticas existentes). Por lo tanto, los datos más fiables de los cultivos son los obtenidos por las estaciones locales de investigación reservados para la materia.	FAO en línea por medio de Información Mundial y Sistema de Alerta Temprana ofrecen calendarios de los cultivos más importantes para países en desarrollo.
Mapas de cultivos	Información de áreas de cultivo cosechadas y producción.	En la página web del Departamento de Geografía de la Universidad de McGill, Canadá, Grupo investigador de Uso de Tierra y Cambio Ambiental Mundial proporciona información de alrededor de 175 cultivos.

Tabla 2.5 Continuación

Rendimiento de cultivos	La mejor información sobre este tema se puede obtener localmente, en el nivel de resolución espacial requerida.	FAO una base de datos global está disponible a través de su página web.
Mapas de suelos	Manejo de información sobre las propiedades del suelo.	ISRIC-WISE proporciona un conjunto de datos mundiales de las propiedades derivadas del suelo. FAO GeoNetwork ofrece un máximo de datos disponibles acerca de la humedad del suelo.
Mapas de irrigación	Áreas de campos de irrigación	La Global Map of Irrigation Areas 4.0.1 (GMIA) define las áreas con irrigación. En la página web de la Universidad de Frankfurt es posible encontrar mapas de irrigación para 26 cultivos.
Tasas de aplicación de fertilizantes	Es ampliamente preferible que los cálculos se hagan en base a información local.	FertiStat ofrece una base de datos mundiales. La International Fertilizer Association (IFA) proporciona el consumo anual de fertilizantes por país.
Tasas de aplicación de pesticidas	Es ampliamente preferible que los cálculos se hagan en base a información local.	El National Agricultural Statistics Service (NASS) ofrece en línea su base de datos del uso de productos químicos por cultivo de EE.UU. CropLife Foundation proporciona una base de datos del uso de pesticidas para EE.UU. Eurostat da información de Europa.
Fracciones de lixiviación y escurrimiento	Se tendrá que trabajar con los datos experimentales de estudios de campo y hacer suposiciones.	Sin bases de datos disponibles.
Normas ambientales de calidad del agua	Preferiblemente utilizar las normas locales, según lo dispuesto en la legislación.	Diversas según el área, zona o lugar específico.

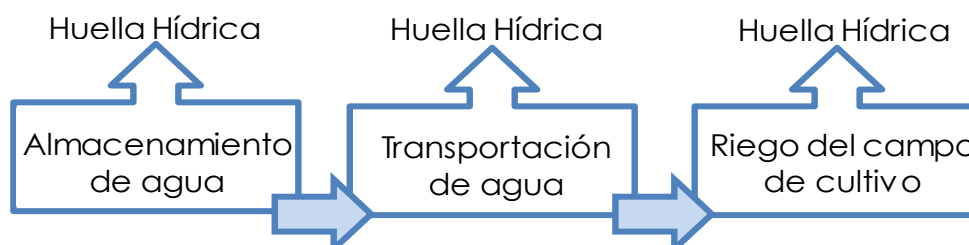
Tabla 2.5 Continuación

Normas de calidad del agua	Preferiblemente utilizar las normas locales, según lo dispuesto en la legislación.	Diversas según el área, zona o lugar específico.
Concentraciones naturales en cuerpos receptores de agua	Cuando no haya información disponible, asumir la concentración natural de acuerdo con la mejor estimación o igual a cero	Diversas según el área, zona o lugar específico. El United Nations Environment Programme (UNEP) ofrece su base de datos.
Concentración real del consumo de agua		El United Nations Environment Programme (UNEP) ofrece su base de datos.

Fuente: Modificada de Hoekstra *et al.*, 2011

Ya se ha visto el cálculo de la HH de un cultivo en el campo. La HHA calculada se refiere sólo a la evapotranspiración del agua de riego de los campos de cultivo. Se excluye la evaporación del agua de los embalses artificiales de agua superficial contruidos para almacenarla al igual que la evaporación de agua de los canales de transporte que traen el líquido desde el lugar de la extracción hasta el campo, en ambos casos el recurso hídrico está destinado al riego. El almacenamiento y transportación del agua son dos procesos que preceden al proceso de crecimiento de los cultivos en el campo y tienen su propia HH (figura 2.6). Las pérdidas por evaporación en estos dos pasos predecesores del proceso pueden ser muy significativas e idealmente deberían ser incluidas cuando se está interesado en la HH del producto cosechado.

Figura 2.6 Procesos posteriores al riego

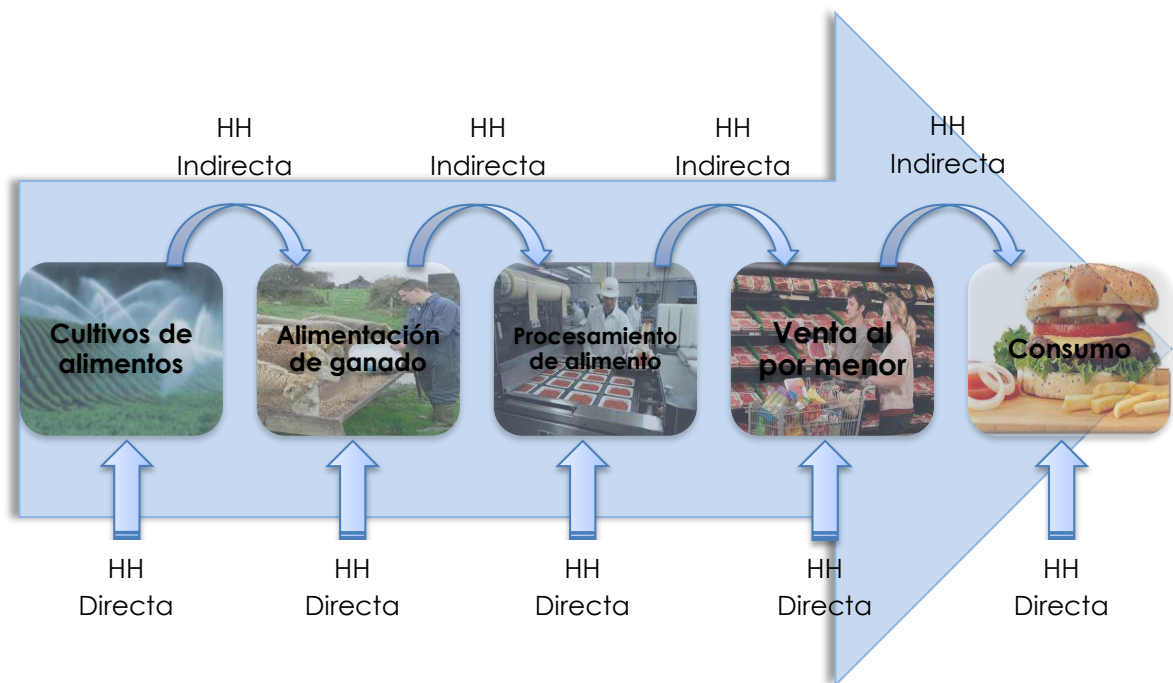


Fuente: Modificada de Hoekstra *et al.*, 2011.

### 2.2.3- Huella Hídrica de un producto

La Huella Hídrica (HH) de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza directamente o indirectamente para elaborar el producto (Figura 2.7). Se calcula teniendo en cuenta el consumo de agua y su contaminación en todas las etapas de la cadena de producción. Se puede calcular de dos formas alternativas: con el enfoque de la suma de la cadena o el enfoque acumulativo paso a paso.

Figura 2.7 HH directa e indirecta en cada etapa de la cadena de suministro de un producto



Fuente: Modificado de Hoekstra *et al.*, 2011

El primer enfoque es más sencillo que el segundo, pero sólo se puede aplicar en el caso en que un sistema de producción produzca un insumo de salida (figura 2.8). En este sistema de producción simple, la HH de producto  $p$  ( $WF_{prod}[p]$ ) se obtiene mediante la fórmula 2.15:

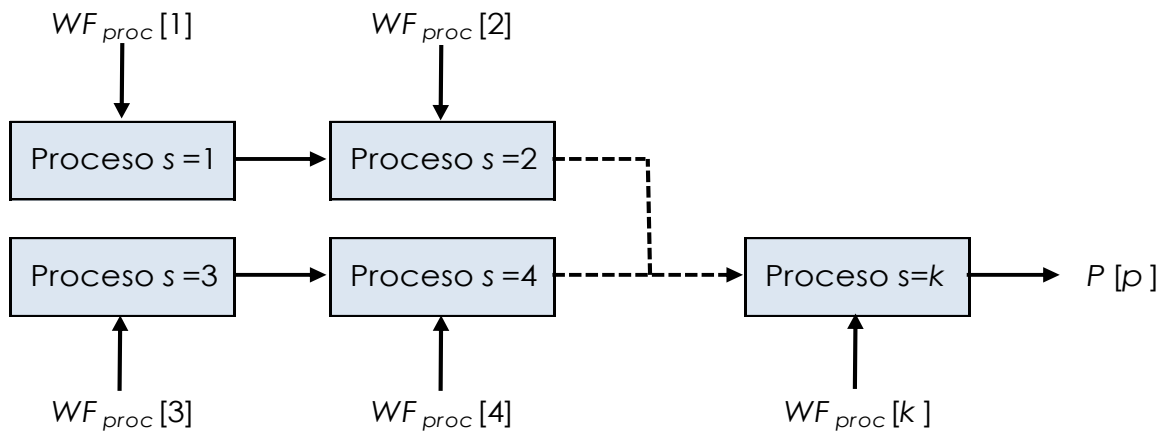
$$WF_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k WF_{proc}[s]}{P[p]} \quad 2.15$$

Dónde:

$WF_{proc}[s]$  = HH del proceso de la etapa del proceso  $s$  (vol/tiempo)

$P[p]$  = Cantidad de producción del producto  $p$  (masa/tiempo)

Figura 2.8 Esquematización del sistema de producción



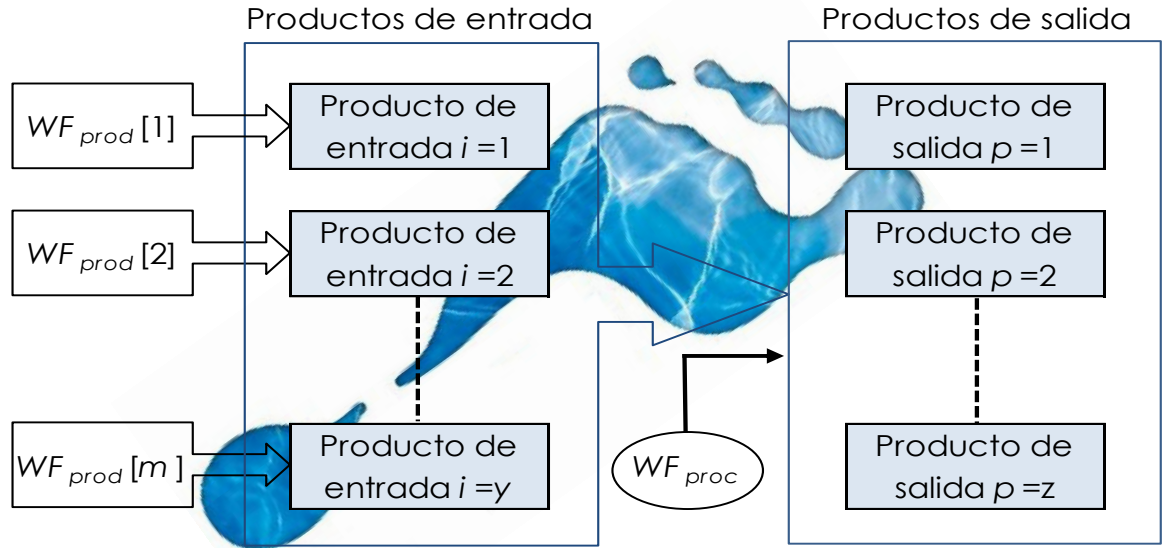
Fuente: Adaptada de Hoekstra *et al.*, 2011.

El segundo enfoque, acumulativo paso a paso, es una manera genérica de calcular la HH de un producto basado en las HH de los productos de entrada que fueron necesarios en el último paso del proceso para producir ese insumo y la HH de esa etapa del proceso.

Supóngase que se tiene un número de productos de entrada al hacer un producto de salida. En este caso se puede obtener la HH del producto de salida, simplemente sumando las HH de los productos de entrada y añadir la HH del proceso. Por otro lado, en caso de tener un producto de entrada y un número de productos de salida, es necesario distribuir la HH del producto de entrada a sus productos separados. Esto puede hacerse en proporción al valor de los productos de salida. También podría hacerse proporcionalmente al peso de los productos, pero esto sería menos significativo.

Por último, en el caso más genérico (figura 2.9), se visualiza calcular la HH de un producto “p”, el cual está siendo procesado a partir de los productos de salida de “y”. Los insumos de entrada se numeran desde  $i=1$  hasta “y”. Supongamos que el procesamiento de los productos de entrada de “y” resultan en los productos de salida “z” entonces enumeraremos los productos de salida desde  $p=1$  hasta “z”.

Figura 2.9 Ilustración de la última etapa del sistema de producción para elaborar producto “p”



Fuente: Adaptada de Hoekstra et al., 2011.

La HH de un producto de salida “p” ( $WF_{prod}[p]$ ) se calcula de la siguiente manera (fórmula 2.16):

$$WF_{prod}[p] = \left( WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p, i]} \right) \times f_v[p] \quad 2.16$$

Dónde:

$WF_{proc}[p]$  = HH del proceso de la etapa que transforman los productos de entrada “y” en productos de salida “z” (vol/masa)

$WF_{prod}[i]$  = HH del producto de salida “i” (vol/masa)

$f_p[p,i]$  = Fracción del producto (masa/masa)

$f_v[p]$  = Valor de la fracción (unidad monetaria/ unidad monetaria)

$P[p]$  = Cantidad de producción del producto  $p$  (masa/tiempo)

La fracción del producto de un insumo de salida " $p$ " que se procesa a partir de un elemento de entrada " $i$ " ( $f_p[p,i]$ ) se define por tanto así (fórmula 2.17):

$$f_p[p,i] = \frac{w[p]}{w[i]} \quad 2.17$$

Dónde:

$w[p]$  = Cantidad del insumo de salida (masa)

$w[i]$  = Cantidad del elemento de entrada (masa)

La fracción del valor de un insumo de salida " $p$ " ( $f_v[p]$ ) se obtiene a partir de la fórmula 2.18:

$$f_v[p] = \frac{price[p] \times w[p]}{\sum_{p=1}^z (price[p] \times w[p])} \quad 2.18$$

Dónde:

$price[p]$  = Precio del producto " $p$ " (unidad monetaria/masa)

$w[p]$  = Cantidad del insumo de salida (masa)

En un caso sencillo, en el que procesa un solo producto de entrada para obtener uno de salida, el cálculo de la HH de este ( $WF_{prod}[p]$ ) se hace bastante simple (fórmula 2.19):

$$WF_{prod}[p] = WF_{proc}[p] + \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \quad 2.19$$

Dónde:

$WF_{proc}[p]$  = HH del proceso de la etapa que transforman los productos de entrada " $y$ " en productos de salida " $z$ " (vol/masa)

$WF_{prod}[i]$  = HH del producto de salida " $i$ " (vol/masa)

$f_p[p,i]$  = Fracción del producto (masa/masa)

#### 2.2.4- Huella Hídrica de un consumidor o grupo de consumidores

La Huella Hídrica (HH) de un consumidor se define como el volumen total de agua dulce consumida y contaminada durante la producción de los bienes y servicios utilizados por el consumidor. La HH de un grupo de consumidores es igual a la suma de las HH de los consumidores individuales.

La HH de un consumidor ( $WF_{cons}$ ) se calcula sumando la HH directa del individuo y su HH indirecta (fórmula 2.20):

$$WF_{cons} = WF_{cons,dir} + WF_{cons,indir} \quad 2.20$$

Dónde:

$WF_{cons,dir}$  = HH directa (vol/tiempo)

$WF_{cons,indir}$  = HH indirecta (vol/tiempo)

El término de indirecto de agua ( $WF_{cons,indir}$ ) se obtiene de acuerdo a la fórmula 2.21:

$$WF_{cons,indir} = \sum (C[p]) \times WF_{prod}^*[p] \quad 2.21$$

Dónde:

$C[p]$  = Consumo del producto "p" (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}^*[p]$  = HH del producto (vol de agua/unidad de producto)

La HH promedio consumida de un producto "p" ( $WF_{prod}^*[p]$ ) está definida por la fórmula 2.22:

$$WF_{prod}^*[p] = \frac{\sum_x (C[x,p] \times WF_{prod}[x,p])}{\sum_x C[x,p]} \quad 2.22$$

Dónde:

$C[x,p]$  = Consumo del producto "p" desde el origen "x" (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}[x,p]$  = HH del producto "p" desde el origen "x" (vol de agua/unidad de producto)



### 2.2.5- Huella Hídrica dentro de un área geográficamente delimitada

Esta Huella Hídrica (HH) está definida como el consumo y contaminación total de agua dulce dentro de los límites de la zona. Es de suma importancia definir claramente estos límites del área considerada. El área puede ser una zona de influencia, una cuenca fluvial, una provincia, estado o nación o cualquier otra unidad espacial hidrológica o administrativa.

La HH dentro de un área geográficamente delimitada ( $WF_{area}$ ) se calcula con ayuda de la fórmula 2.23:

$$WF_{area} = \sum_q WF_{proc}[q] \quad 2.23$$

Dónde:

$WF_{proc}[q]$  = HH de un proceso "q" dentro de la zona geográfica delimitada (vol/tiempo)

Desde el punto de vista de la protección del recurso hídrico dentro de un área determinada (en particular cuando la zona tiene problema de escasez) es interesante saber cuánta agua se utiliza en el área para producir productos de exportación y la cantidad de agua que se importa de forma virtual (contenida en productos de alto consumo hídrico), de modo que no tienen que ser producidos dentro de la zona. En otras palabras, resulta de gran ayuda conocer el Balance Agua Virtual (BAV) de una zona.

El BAV de un área geográficamente delimitada durante un período de tiempo determinado se define como la importación neta de agua virtual durante ese período ( $V_{i, net}$ ). Su cálculo se expresa con la siguiente fórmula 2.24:

$$V_{i, net} = V_i - V_e \quad 2.24$$

Dónde:

$V_i$  = Importación bruta de agua virtual (vol)

$V_e$  = Exportación bruta de agua virtual (vol)

Un BAV que resulte positivo significa que hay una influencia neta de agua virtual del área en estudio proveniente de otras zonas. Por otro lado, si la resultante es un BAV negativo, implica que hay una salida neta de agua virtual.

## 2.2.6- Contabilidad de la Huella Hídrica Nacional

### 2.2.6.1- Marco de contabilización de la Huella Hídrica Nacional

La cuenta completa de la Huella Hídrica (HH) se obtiene combinando las HH del consumo nacional (sección 2.2.4) y las HH dentro de un país (sección 2.2.5). La figura 2.10 muestra una representación de la contabilidad de la HH nacional.

La HH de los consumidores de un país ( $WF_{cons,nat}$ ) tiene dos elementos: la HH interna ( $WF_{cons,nat,int}$ ) y la HH externa ( $WF_{cons,nat,ext}$ ), expresada en la fórmula 2.25. El primer componente, se define como el uso de recursos hídricos nacionales para producir bienes o servicios consumidos por la población del país y se obtiene con la fórmula 2.26. El segundo componente, se traduce como el volumen de recursos hídricos utilizado en otros países para producir bienes y servicios que son consumidos por la población de la nación considerada, se expresa con la fórmula 2.27.

$$WF_{cons,nat} = WF_{cons,nat,int} + WF_{cons,nat,ext} \quad 2.25$$

Dónde:

$$WF_{cons,nat,int} = \text{HH interna (vol/tiempo)}$$

$$WF_{cons,nat,ext} = \text{HH externa (vol/tiempo)}$$

$$WF_{cons,nat,int} = WF_{area,nat} - V_{e,d} \quad 2.26$$

Dónde:

$$WF_{area,nat} = \text{Suma de la HH dentro del país (vol/tiempo)}$$

$$V_{e,d} = \text{Volumen de agua virtual exportada (vol/tiempo)}$$

$$WF_{cons,nat,ext} = V_i - V_{e,r} \quad 2.27$$

Dónde:

$V_i$  = Importación de agua virtual al país (vol/tiempo)

$V_{e,r}$  = Volumen de agua virtual de la exportación a otras naciones como resultado de la re-exportación de los productos importados (vol/tiempo)

El agua virtual exportada de un país ( $V_e$ ) consiste en agua exportada de origen nacional ( $V_{e,d}$ ) y agua re-exportada de origen extranjero ( $V_{e,r}$ ) expresada mediante la fórmula 2.28:

$$V_e = V_{e,d} + V_{e,r} \quad 2.28$$

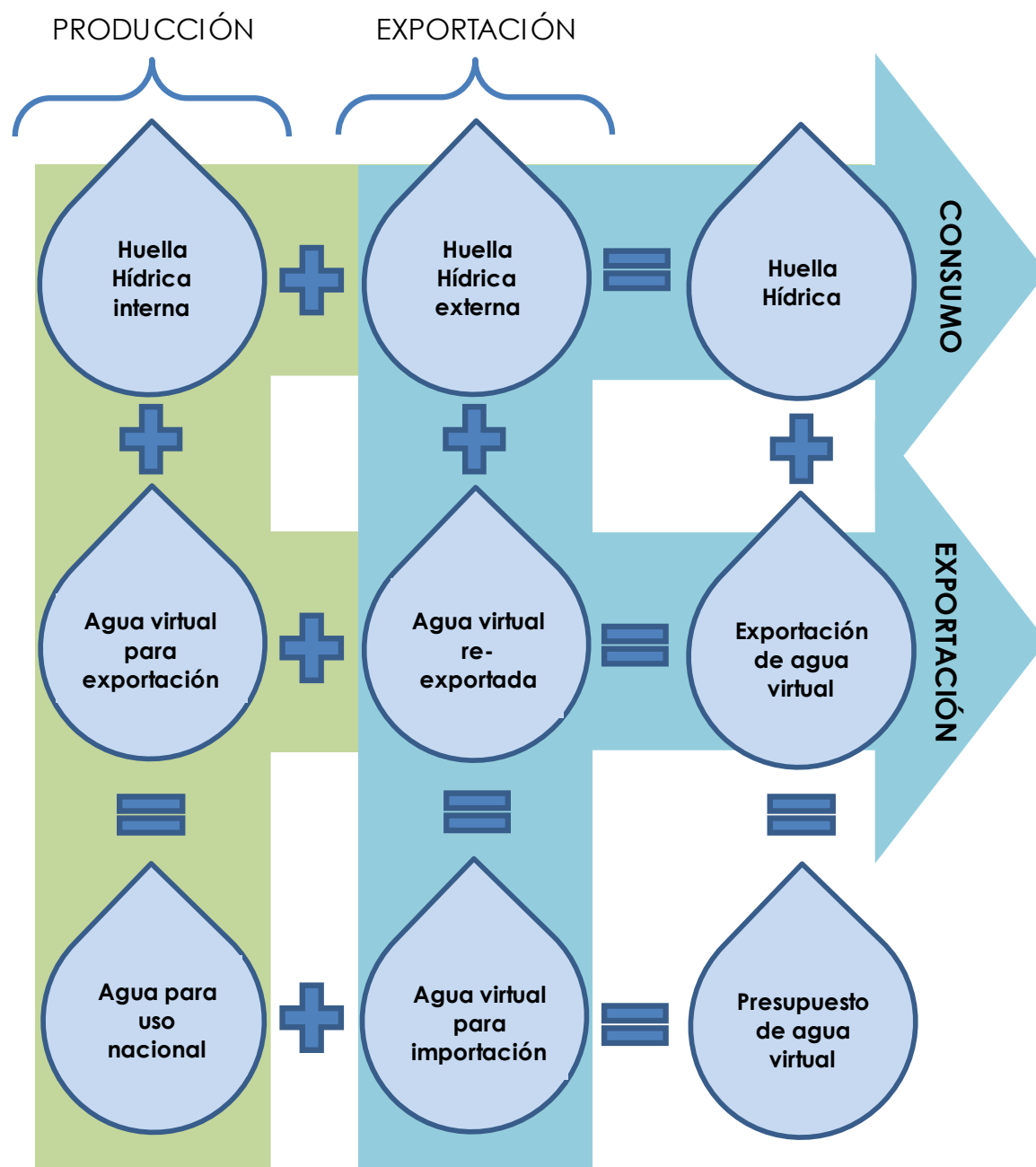
La importación de agua virtual al país parcialmente será consumida, constituyendo así la HH externa del consumo nacional ( $WF_{cons,nat,ext}$ ), y en parte se re-exporta ( $V_{e,r}$ ), fórmula 2.39:

$$V_e = V_{e,d} + V_{e,r} \quad 2.29$$

La suma de los términos  $V_i$  y  $WF_{area,nat}$  es igual a la suma de  $V_e$  y  $WF_{cpns,nat}$ . Esta suma es denominada presupuesto de agua virtual ( $V_b$ ) de un país (fórmula 2.30):

$$V_b = V_i + WF_{area,nat} = V_e + WF_{cons,nat} \quad 2.30$$

Figura 2.10 Ámbito doméstico de contabilidad del agua



Fuente: Adaptada de Aldaya, 2012.

### 2.2.6.2- Cálculo de la Huella Hídrica de un país

La HH de un país ( $WF_{area,nat}$ ) es definida como el volumen total de agua dulce consumida o contaminada dentro del territorio de la nación en cuestión. Se puede calcular siguiendo el método descrito en la sección 2.2.5 (fórmula 2.31):

$$WF_{area,nat} = \sum_q WF_{proc}[q] \quad 2.31$$

Dónde:

$WF_{proc}[q]$  = HH del proceso “q” dentro del país que consume o contamina agua (vol/tiempo)

### 2.2.6.3- Cálculo del consumo nacional de la Huella Hídrica

La HH de consumo nacional ( $WF_{cons,nat}$ ) puede ser calculada a través de dos enfoques alternativos: “top-down” y “bottom-up”.

El enfoque “top-down”, la  $WF_{cons,nat}$  es obtenida mediante la fórmula 2.32:

$$WF_{cons,nat} = WF_{area,nat} + V_i - V_e \quad 2.32$$

Dónde:

$WF_{area,nat}$  = HH del país (vol/tiempo)

$V_i$  = Importación de agua virtual (vol/tiempo)

$V_e$  = Exportación de agua virtual (vol/tiempo)

Para conocer el volumen de importación de agua virtual ( $V_i$ ), consideraremos nuestra importación bruta, mediante la fórmula 2.33:

$$V_i = \sum_{n_e} \sum_p (T_i[n_e, p] \times WF_{prod}[n_e, p]) \quad 2.33$$

Dónde:

$T_i[n_e, p]$  = Cantidad del producto "p" proveniente de la nación exportadora "n<sub>e</sub>" (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}[n_e, p]$  = HH del producto "p" en el país exportador "n<sub>e</sub>" (vol/unidad de producto)

Si se conoce el lugar de origen dentro del país exportador, se puede tomar la HH del producto del lugar específico. Cuando un insumo es importado a una nación la cual no elabora el producto y cuando la información sobre el origen real es deficiente, se puede asumir la HH global promedio del producto.

Por otro lado, otro factor a considerar es la cantidad bruta de agua exportada ( $V_e$ ), la cual será evaluada por medio de la fórmula 2.34:

$$V_e = \sum_p T_e[p] \times WF_{prod}^*[p] \quad 2.34$$

Dónde:

$T_e[p]$  = Cantidad del producto "p" exportado del país (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}^*[p]$  = HH promedio del producto exportado "p" (vol/unidad de producto)

Este último elemento ( $WF_{prod}^*[p]$ ) se estima por medio de (fórmula 2.34):

$$WF_{prod}^*[p] = \frac{P[p] \times WF_{prod}[p] + \sum_{n_e} (T_i[n_e, p] \times WF_{prod}[n_e, p])}{P[p] + \sum_{n_e} T_i[n_e, p]} \quad 2.34$$

Dónde:

$P[p]$  = Cantidad de producción del producto "p" en el país (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}[p]$  = HH promedio del producto "p" cuando es elaborado en el país considerado (vol/unidad de producto)

$T_i[n_e, p]$  = Cantidad de producto "p" importado del país exportador "n<sub>e</sub>" (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}[n_e, p]$  =HH promedio del producto exportado "p" (vol/unidad de producto)

Nuestro segundo enfoque denominado *bottom-up*, está basado en el método de evaluación de la HH descrito en la sección 2.2.4, la cual dice que un grupo de consumidores consiste en los habitantes de un país. La HH de consumo nacional se calcula sumando la HH directa e indirecta de los residentes (fórmula 2.35):

$$WF_{cons,nat} = WF_{cons,nat,dir} + WF_{cons,nat,indir} \quad 2.35$$

Dónde:

$WF_{cons,nat,dir}$  = HH nacional directa (vol/tiempo)

$WF_{cons,nat,indir}$  = HH nacional indirecta (vol/tiempo)

La HH directa se refiere al consumo y contaminación de agua debido al uso de la misma por consumidores en casa o jardín. Se denomina HH indirecta al empleo por otros de agua para elaborar bienes y servicios consumidos (comida, ropa, papel, energía y bienes industriales) y es evaluada con la fórmula 2.36:

$$WF_{cons,nat,dir} = \sum_p (C[p] \times WF_{prod}^*[p]) \quad 2.36$$

Dónde:

$C[p]$  = Consumo de producto "p" dentro del país (unidades de producto/tiempo)

$WF_{prod}^*[p]$  =HH del producto "p" (vol/unidad de producto)

La HH promedio del insumo "p" consumido en un país se calcula aplicando la misma suposición que se utilizó en el enfoque de *top-down* (fórmula 2.34).

Con ambos es posible calcular la HH consumo nacional total ( $WF_{cons,nat}$ ). El enfoque "top-down" permite estimar la importación de agua virtual a un país ( $V_i$ ), anteriormente (sección 2.2.6.1) se describió el método para determinar la HH dentro de un país ( $WF_{area,nat}$ ), basado en este hecho, la HH externa de consumo nacional ( $WF_{const,nat,ext}$ ) es determinada por medio de la fórmula 2.37:

$$WF_{cons,nat,ext} = \frac{WF_{cons,nat}}{WF_{area,nat} + V_i} \times V_i \quad 2.37$$

La fórmula 2.37 es aplicable por separado para la categoría de productos agrícolas e industriales, además nos dice que sólo una fracción de agua virtual exportada bruta puede ser considerada parte de la HH externa de consumo nacional ( $WF_{cons,nat,ext}$ ) y este fragmento es equivalente a la porción del presupuesto de agua virtual que se le ha de atribuir. La otra parte es exportada y no es, por lo tanto, parte de la HH.

Es posible estimar la  $WF_{cons,nat,ext}$  de un país exportador “ $n_e$ ” y el producto “ $p$ ” asumiendo que la relación nacional entre la HH externa y el total de las importaciones de agua virtual se aplica a todos los países socios y los productos importados (fórmula 2.38):

$$WF_{cons,nat,ext}[n_e, p] = \frac{WF_{cons,ext}}{V_i} \times V_i[n_e, p] \quad 2.38$$

#### 2.2.6.4- Ahorros hídricos relacionados con el comercio

El ahorro nacional de agua ( $S_n$ ) de un país como resultado del comercio en un producto “ $p$ ” se define con la fórmula 2.39:

$$S_n[p] = (T_i[p] - T_e[p]) \times WF_{prod}[p] \quad 2.39$$

Dónde:

$WF_{prod}[p]$  = HH del producto “ $p$ ” en el país considerado (vol/ unidades de producto)

$T_i[p]$  = Volumen importado del producto “ $p$ ” (unidades de producto/tiempo)



$T_e[p]$  = Volumen exportado del producto "p" (unidades de producto/tiempo)

Evidentemente el valor de  $S_n$  puede darse con un valor negativo, la cual significa que hay una pérdida neta de agua en lugar de un ahorro.

De igual manera nos resulta posible evaluar el ahorro de agua a nivel global ( $S_g$ ) a través de la comercialización de dicho producto de un país exportador ( $n_e$ ) a uno importador ( $n_i$ ), de acuerdo a la fórmula 2.40:

$$S_g[n_e, n_i, p] = T[n_e, n_i, p] \times (WF_{prod}[n_i, p] - WF_{prod}[n_e, p]) \quad 2.39$$

Dónde:

$T$  = Volumen de intercambio de "p" entre los dos países involucrados (unidades de producto/tiempo)

Cuando el país importador no es capaz de producir el producto en el país, se recomienda tomar la diferencia entre la HH mundial promedio y la HH en el país exportador de dicho insumo. El ahorro total mundial de agua se puede obtener sumando los ahorros globales de todos los flujos internacionales de comercio. Por lo tanto, este término equivale a la suma de los volúmenes nacionales de agua economizados de todos los países.

#### **2.2.6.5- Dependencia hídrica nacional comparada contra la autosuficiencia hídrica**

Es importante conocer las necesidades de agua de cada país para proyectar una idea del estado actual de los recursos hídricos nacionales, ya que esto tendrá su impacto (favorable o no) en la manera de gestionarlos y buscar alternativas en cuanto a la importación y/o exportación de agua virtual se refiere.

Definimos la dependencia de un país por la importación de agua virtual (WD) y su autosuficiencia nacional (WSS) a través de la fórmula 2.40 y 2.41 respectivamente:

$$WD = \frac{WF_{cons,nat,ext}}{WF_{cons,nat}} \times 100 \quad 2.40$$

$$WSS = \frac{WF_{cons,nat,int}}{WF_{cons,nat}} \times 100 \quad 2.41$$

La autosuficiencia es cien por ciento cuando toda el agua requerida está disponible y es tomada dentro del territorio nacional. En cambio puede irse aproximando al cero si las demandas de bienes y servicios de un país están fuertemente asociadas con las importaciones brutas de agua virtual.

### **2.2.7- Contabilidad de la Huella Hídrica para áreas de captación y cuencas**

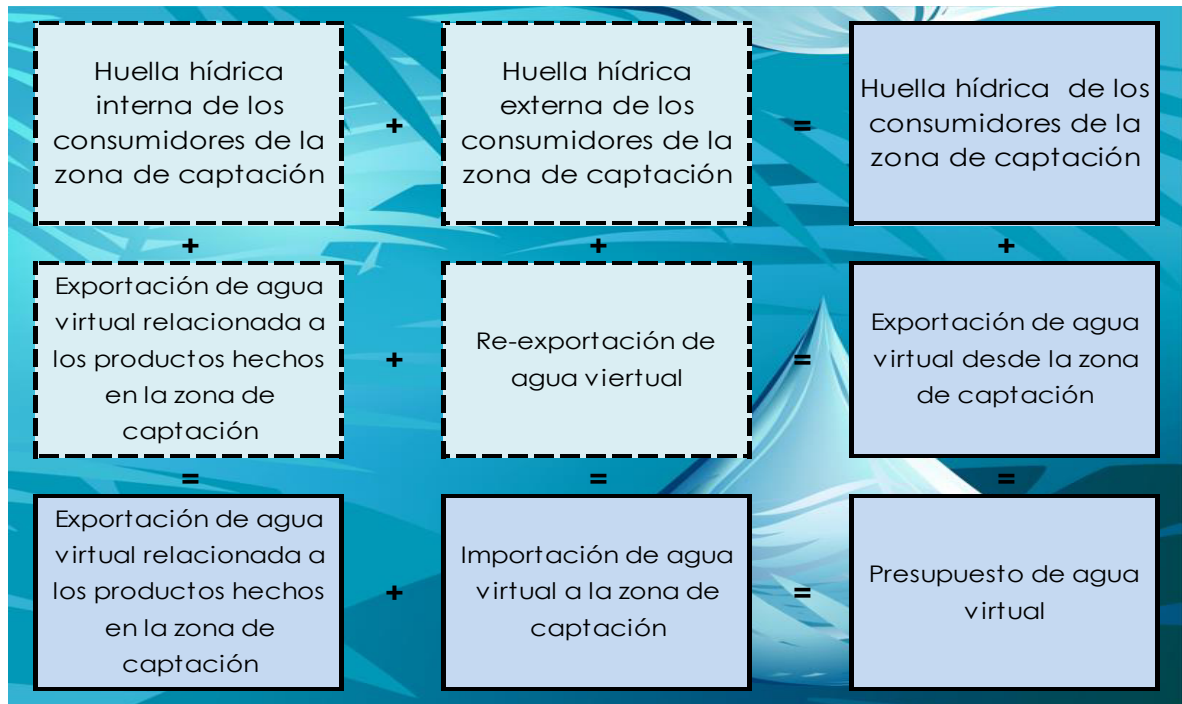
En las áreas de captación y cuencas, la Huella Hídrica (HH) es similar a la nacional (Sección 2.2.6). La única diferencia está en la definición de los límites de las áreas consideradas. La figura 2.11 muestra su esquema correspondiente.

A manera de guía, para calcular la HH en este rubro, es posible seguir el mismo método que el utilizado para el determinar la HH nacional (sección 2.6), la diferencia radica en el hecho de que la información sobre el ámbito del comercio no se encuentra disponible, caso contrario a la de las naciones. En cambio, los flujos comerciales requieren ser integrados de los datos a nuestra disposición, o bien, con las estimaciones sobre producción y consumo dentro de la zona de captación.

Cierto es, que no siempre será necesario llevar a cabo la contabilización de la HH en la totalidad de la zona, depende principalmente de nuestro objetivo, pero concretamente quienes gestionan estas áreas, serán los primeros interesados en conocer su HH, dejando un poco de lado la HH externa de las personas que se encuentran viviendo dentro de la misma. Sin embargo, para tener mayor

comprensión entre la relación uso del agua y sostenibilidad de la comunidad, se requerirá un estudio completo en toda la zona.

Figura 2.11 Esquema de la contabilidad de la HH en la zona de captación



Fuente: Adaptada de Hoekstra *et al.*, 2011

### 2.2.8- Huella Hídrica de una empresa/negocio

Definiremos la Huella Hídrica (HH) de una empresa, como el volumen total de agua dulce que se utiliza, de forma indirecta y directa, para hacer trabajar y mantener en funcionamiento una empresa.

Esta HH consta de dos componentes principales (figura 2.12): la utilización de manera directa de agua dulce por parte del productor para fabricar o realizar actividades de apoyo (incluyendo la cantidad de líquido contaminado debido a las operaciones realizadas) y el empleo indirecto de agua para elaborar todos los

bienes y servicios que conforman la oferta de la empresa. Dicho de manera simple, la HH operacional (o directa) y HH de la cadena de suministro (o indirecta) de la empresa.

Para lograr diferenciar entre la HH que puede ser ligada inmediatamente con el producto(s) elaborados y la de gastos generales, es necesario distinguir ambos componentes. Este último término se utiliza para identificar el consumo de agua que se requiere para el continuo funcionamiento de la empresa, pero que no está directamente relacionada con la fabricación de un producto en particular. La tabla 2.6 muestra algunos ejemplos de los diferentes elementos de HH de una empresa.

La HH de una empresa ( $WF_{bus}$ ) viene a dar mediante la aplicación de la fórmula 2.42:

$$WF_{bus} = WF_{bus,oper} + WF_{bus,sup} \quad 2.42$$

Dónde:

$WF_{bus,oper}$  =Huella Hídrica de operación (vol/tiempo)

$WF_{bus,sup}$  =Huella Hídrica de la cadena de suministro (vol/tiempo)

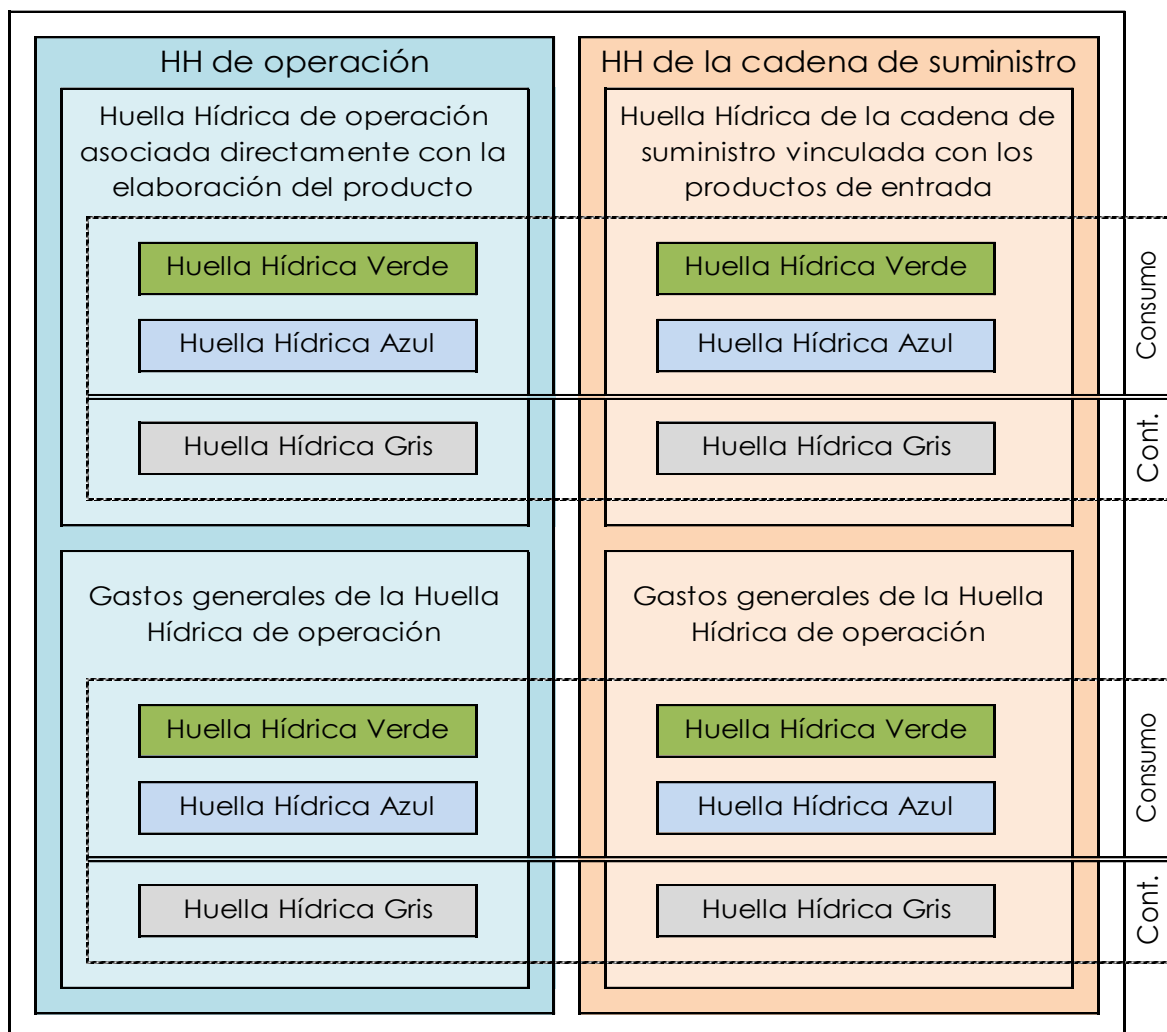
La Huella Hídrica de operación está constituida de los siguientes elementos (fórmula 2.43):

$$WF_{bus,oper} = WF_{bus,oper,inputs} + WF_{bus,oper,overhead} \quad 2.43$$

Mientras que el componente restante, HH de la cadena de suministro, está determinada de acuerdo a la fórmula 2.44:

$$WF_{bus,sup} = WF_{bus,sup,inputs} + WF_{bus,sup,overhead} \quad 2.44$$

Figura 2.12 Elementos que conforman la HH de una empresa



Fuente: Adaptada de Hoekstra *et al.*, 2011

Tabla 2.6 Algunos ejemplos del uso de los componentes de la HH de una empresa

HH de operación		HH de la cadena de suministro	
Asociada con la elaboración del producto(s)	Gastos generales	Asociada con la elaboración del producto(s)	Gastos generales
Integración de agua al producto.	Consumo o contaminación de agua en cocinas, inodoros, limpieza, jardinería o lavado de ropa de trabajo.	HH de los ingredientes de los productos adquiridos	HH de la infraestructura (materiales de construcción, etcétera)
Volumen de agua utilizada o contaminada por el proceso de lavado.		HH de otros artículos comprados para el procesamiento de sus productos	HH de los materiales y energía de uso general (oficina, automóviles, combustibles, electricidad, etcétera).
Agua térmicamente contaminada mediante su uso para enfriamiento.			

Fuente: Adaptada de Hoekstra *et al.*, 2011

## 3.- HUELLA ECOLÓGICA

### 3.1.- Introducción

La vida humana como sus todas sus actividades depende de lo que la naturaleza le proporciona. La implicación de esta máxima ecológica es claramente obvia: para ser una especie sostenible debemos aprender a vivir dentro de la capacidad natural (Wackernagel *et al.* 1999). Cualquier ser viviente necesita de los recursos que le brinda este planeta para su desarrollo: alimento, agua y energía, son elementos indispensables para su supervivencia. En el caso del ser humano, la cantidad requerida de estos recursos se ve estrechamente relacionada con el estilo de vida que mantiene. El impacto que un individuo, ciudad o país provoca en la tierra, para satisfacer sus demandas de consumo y absorber sus desechos, se conoce como Huella Ecológica (HE).

La HE se ha posicionado como la principal medida a nivel mundial de la demanda humana sobre la naturaleza. Calcula cuánta área de la tierra y de agua necesita una población humana para producir el recurso que consume y absorber sus desechos usando la tecnología de la cual dispone en ese momento. Hablamos pues, de una herramienta de cuantificación ecológica que emplea áreas de terreno productivo como una unidad de medida (Leiva-Mas *et al.*, 2010).

La HE evalúa un determinado modelo de vida en una zona específica, su escala de estudio puede ser desde mundial, por país, ciudad o zonas determinadas, industrial e individual (Gottlieb *et al.*, 2012). Es expresada en hectáreas globales, representando la superficie de planeta necesaria para asimilar el impacto generado de las actividades del modelo de vida en cuestión. Estas unidades son hectáreas con una capacidad productividad promedio mundial aplicadas para todas las áreas tanto terrestres como acuáticas en un determinado año. Aquellas evaluaciones que acompañan los Estándares de la Huella Ecológica actuales ([www.footprintstandards.org](http://www.footprintstandards.org)) emplean las hectáreas globales como unidad de

medida. Esto conlleva que los resultados de la HE puedan ser globalmente comparables entre sí, de manera cómo los estudios financieros utilizan una divisa (dólares, euros, etc.) para constatar transacciones y flujos financieros mundiales (Global Footprint Network, 2011).

Podemos hablar de HE como un indicador que nos auxilia en la evaluación de la biocapacidad, la cual simboliza la competencia de los ecosistemas para producir componentes biológicos utilizables (entendiendo éstos como aquellos materiales que la economía humana ha requerido en un año dado) y para absorber los desechos que se producen por las actividades humanas, haciendo uso de tecnologías de extracción y administración actuales. La HE tiene la ventaja que en algunos casos permite obtener indicadores concretos y realizar comparaciones; dos factores primordiales para establecer el impacto que tiene una actividad sobre la biodiversidad y el equilibrio ecológico.

El principal propósito es determinar si la zona en estudio puede soportar, ecológicamente hablando, las actividades que se producen ahí sin degradar el medio ambiente y así evitar caer en sobregiros ecológicos presentados cuando la demanda de la zona sobre un ecosistema supera la capacidad del mismo para renovar recursos que son consumidos y para lidiar con sus desechos. La HE también es útil para conocer el sobregiro ecológico global (demanda sobre biósfera mayor a la disponibilidad de capacidad biológica mundial). Por entendimiento del sobregiro, éste lleva a la fatiga del capital biológico que sustenta la existencia en el planeta y/o una aglomeración de elementos desechables.

La HE es uno de los primeros intentos para lograr medir la capacidad de demanda humana no como una evaluación especulativa de lo que el planeta puede ser capaz de soportar, sino como una descripción de cuántos planetas se necesitarían en un año dado para apoyar la demanda humana de recursos en ese año (Ruževičius, 2011).

El concepto de HE fue concebido en la Universidad de la Columbia Británica en 1990 por Mathis Wackernagel y William Rees (Ewing *et al.* 2008), la HE está ahora



en amplio uso por la comunidad científica, los negocios, los gobiernos, las agencias, los individuos, y las instituciones que trabajan para supervisar uso del recurso ecológico y para avanzar el desarrollo sustentable. El desarrollo futuro de un determinado recurso depende de varios factores, entre ellos destacan:

- Tecnología disponible
- Infraestructura disponible
- Políticas gubernamentales
- Coste del suelo
- Estrategias de las empresas explotadoras del recurso
- Existencia de precios favorables y redituables
- Disponibilidad de mano de obra debidamente calificada

Estos principios suelen estar presentes en la mayoría de los países, pero en los más desarrollados o ricos, es común considerar otros factores como la opinión de los propietarios del suelo, expertos en medio ambiente y movimientos ecologistas (Alfaro-Barbosa *et al.* 2001).

Sin embargo, aún con los esfuerzos científicos el panorama global actual no es muy alentador: hacia finales de la década de 1970, la humanidad ha caído en un sobregiro ecológico con demanda anual, excediéndose en los recursos que puede regenerar la tierra cada año. Hoy en día (Global Footprint Network, 2011), se estima que la demanda es más del 50 por ciento de lo que el planeta puede regenerar, ahora a la tierra le cuesta un año y cinco meses regenerar lo que utilizamos anualmente. Este constante crecimiento de las necesidades humanas está llevando a la humanidad a cruzar los límites de consumo y viviendo a expensas de futuras generaciones (Ruževičius, 2009).

### 3.2.- Metodología

Las cuentas de la Huella Ecológica (HE) se pueden calcular para distintos niveles: individual, grupos de personas (Calcott y Bull, 2007), un área determinada (Inostroza-Pino, 2005; Wilson y Grant, 2009), país (Hayden y Shandra, 2009; Hopton y White, 2012) y actividades o productos (Momouni-Limnios *et al.* 2009).

Para poder conceder que distintos tipos de campos sean equiparados empleando un denominador común, se usan factores de equivalencia (EQF) con el fin de convertir hectáreas físicas de diversas clases (tierras de cultivo y pastizales) en la unidad en la que se expresa la HE, hablamos de hectáreas globales (hag, igualmente pueden ser convertidas a acres globales). Es una unidad usual que abarca la productividad promedio de toda el área de tierra y mar que es biológicamente fructífera en el mundo en un año determinado. Estas áreas integran tierras de cultivo, bosques y áreas de pesca, dejando fuera zonas desérticas, glaciares y el mar abierto. Es la unidad común y estandarizada manejada para reportar la HE y la biocapacidad a lo largo del tiempo y es aplicable para zonas en todo el planeta (Global Footprint Network, 2011).

Una hag resulta ser un área con productividad estandarizada que proporciona un flujo definido continuo de bienes y servicios para el uso humano. Técnicamente, una persona con una HE de 5 hag demanda 5 hag de área en cualquier período de tiempo:

- En un año, esa persona demanda la cantidad de bienes y servicios producidas por 5 hag en ese año.
- En dos años, esa persona demanda la cantidad de bienes y servicios producidos por 5 hag en dos años.
- En un día, esa persona demanda la cantidad de bienes y servicios producidos por 5 hag en un día, y así continúa.

Dado que la HE se refiere a una demanda continua y la biocapacidad a un suministro continuo, ambos conceptos están acertadamente expresados en hag.

Debido a que la producción global total se ve constantemente cambiada a través del factor tiempo, el volumen de material físico producido por una única hag también va cambiando. El uso de esta unidad admite el hecho que diferentes tipos de terreno poseen diferentes habilidades para producir bienes y servicios rentables para las personas. Por ejemplo, una hectárea de tierra de plantación puede ver una mayor producción de cantidad de productos alimenticios y de valor que una sola hectárea de tierras de pastoreo. Al transformar en hag tanto tierras de cultivo y como las de pastoreo, es posible compararlas equitativamente.

Como se mencionó inicialmente, el uso de EQF corresponden al factor determinante para que se permita que los diferentes tipos de tierra sean convertidos a la unidad común (hag). Es un factor de la escala con base en la productividad que se ve transformada una hectárea de tierra promedio mundial de un tipo en particular, como tierra de cultivo o bosque, en un número equitativo de hag.

Estos EQF se basan en las evaluaciones de la productividad relativa de la tierra de acuerdo con diferentes tipos de terreno en un cierto año. En las cuentas de HE más recientes se utiliza un índice en el cual presenta la idoneidad para la producción agrícola como una medida alusiva de la capacidad productiva de diferentes tipos de terreno (Global Footprint Network, 2011).

Paralelamente al EQF encontramos los factores de rendimiento (YF). Dependiendo del tipo de terreno, la capacidad de un área para producir bienes y servicios puede variar en demasía según elementos como el clima, la topografía, o la forma de administración. Los YF hacen posible que diversas áreas de un mismo tipo de terreno puedan ser comparadas basándose en el denominador común de rendimiento.

Ejemplificando los YF nacionales para las tierras de pastoreo, comparan la productividad de tierras de pastoreo promedio en un país en concreto con el promedio mundial de las mismas. Estos YF cambian una hectárea de un tipo de terreno en particular, dentro de un país, a una cantidad igual de hectáreas del

mismo tipo de terreno con un promedio mundial. De esta manera, los EQF nos ayudan para poder convertir las hectáreas de un tipo de terreno con promedio mundial a hag. Los YF nacionales para un tipo de terreno específico es determinado como la tasa del rendimiento nacional promedio de este tipo de terreno (por mencionar, bosques canadienses al rendimiento mundial promedio de ese tipo de terreno). Los YF se calculan para cada tipo de terreno, para cada país y para cada año.

Es importante saber cómo es que la HE tiene en cuenta los flujos de desecho, desde el punto de vista de este indicador, el término "desecho" está compuesto por tres diferentes categorías de materiales (tabla 3.1), y cada una de ellas es tratada de distinta manera dentro de las cuentas de la HE.

Tabla 3.1 Definición de desecho en la HE

Categoría	Descripción
1 <sup>ra</sup>	Desechos biológicos (residuos de cosechas, recortes de árboles cortados y el dióxido de carbono emitido de combustibles fósiles o de madera) están incluidos todos dentro de las cuentas de la HE.
	<u>Ejemplo:</u> Una res pastando en una hectárea de pastizales posee una HE de una hectárea tanto para la fabricación de sus productos biológicos alimenticios como para la absorción de sus productos biológicos de desecho. La misma hectárea proporciona ambos servicios (por ende se contabiliza dos veces la HE de la res). Esto da como resultado un doble conteo del área real requerida para mantener la res. La HE asociada a la absorción de todos los materiales biológicos que son recolectados ya están contados en la HE de estos materiales.
2 <sup>da</sup>	Desechos también puede tratarse del material que es específicamente enviado a los rellenos sanitarios.
	<u>Ejemplo:</u> Si estos rellenos sanitarios ocupan lo que previamente era biológicamente productivo, entonces la HE de estos desechos en el relleno pueden ser calculada como el área utilizada para su almacenamiento a largo plazo.

Tabla 3.1 Continuación

3 <sup>ra</sup>	<p>Desechos puede referirse a los tóxicos y contaminantes emitidos por la economía humana que no pueden ser absorbidos o descompuestos mediante procesos biológicos, como son variadas clases de plásticos.</p>
	<p><u>Ejemplo:</u> Ya que la HE mide el área requerida para producir material o absorber desechos, materiales que no son creados por procesos biológicos ni absorbidos por sistemas biológicos (como los plásticos) no tienen una HE definida. Cuando son liberados en el medio ambiente pueden provocar daños a los ecosistemas, y esta pérdida de biocapacidad puede ser evaluada utilizando la HE. Sin embargo, estas mediciones son difíciles y con frecuencia incompletas. Estudios de HE de tóxicos y contaminantes, cuando han sido finalizados, generalmente se refieren a la HE de la extracción, procesamiento, y manipulación de estos materiales, pero no a la HE de fabricar o absorber estos materiales.</p>

Fuente: Adaptada de Global Footprint Network, 2011

Puesto que la HE plasma la demanda por un área productiva para elaborar recursos y absorber desechos, la acción de reciclar es una alternativa para disminuir la HE al reducir la extracción de productos puros y minimizar el área necesaria para asimilar residuos. En el reciclado de papel es posible atenuar la cantidad total de árboles que deben ser cortados para satisfacer la demanda global de este elemento, y así reducir la HE total de la humanidad. El ahorro derivado del reciclado es posible atribuirlo a quien recicla el material y/o a quien lo adquiere en una variedad de formas (tabla 3.2).

Sin embargo, más allá de los mecanismos de atribución, las altas reducciones en HE se presentan al reducir la cantidad total de materiales consumidos, y no procurando reciclarlos más adelante.

Tabla 3.2 Ejemplo de cómo disminuir la HE

Porcentaje de reciclado	Persona implicada	Descripción
100	Quien se hace con el papel reciclado	La madera, en un paquete de papel reciclado al 100%, puede no tener una HE de área boscosa, debido a que su HE ya habría sido atribuida anteriormente a la persona que compró el papel por primera vez.
100	Quien recicla el papel	Alguien que adquiere papel 100% virgen y que lo recicla en completamente no tendría HE por la madera en ese papel, ya que todo es reusado posteriormente, asumiendo que no se pierde pulpa de madera en el proceso.
Dividido	Entre quien compra papel reciclado y quien lo recicla	El ahorro se puede dividir en un 50% - 50%, o de cualquier otra forma.

Fuente: Adaptada de Global Footprint Network, 2011

Un punto importante en cuanto a HE se refiere es quizá su precisión y perfeccionamiento de los datos, qué tan precisas pueden llegar a ser las medidas de la HE es de sumo interés para quién las realiza y para quienes están interesados en el tema. Las evaluaciones de HE proporcionan un estimado concreto e integrado de la demanda humana sobre la biósfera comparada con la capacidad productiva de ésta. Como pasa con cualquier sistema de cálculo, las cuentas de la HE se encuentran sujetas a la fiabilidad de los datos de la fuente, parámetros de cálculo y cuestiones metodológicas. Barras de error o errores estándares de cálculo no han sido rigurosamente agrupados, y aun hoy no ha sido realizado un estimado de incertidumbre completo, exhaustivo y cuantitativo (Global Footprint Network, 2011).

Sin embargo hay que tener en presente que las cuentas nacionales de la HE (principal componente de las evaluaciones de HE que se apegan a los estándares), están sujetas a frecuentes revisiones y actualizaciones de acuerdo a nuevos datos que tenemos disponibles y la evolución de avances metodológicos. Los cambios en los datos y métodos en las cuentas nacionales de la HE se revisan y se aprueban por el Comité de Cuentas Nacionales (CCN) del órgano más

importante que marca la pauta para la evaluación de éste parámetro: Global Footprint Network (GFN). A pesar del refinamiento, la esencia del modelo conceptual que soporta el análisis de la HE no ha tenido cambios sustanciales desde que fue introducido (Global Footprint Network, 2011).

Enteramente la metodología aquí presentada está basada en los lineamientos que la GFN ha marcado, en 2009 el CCN ha publicado un documento de carácter oficial de estándares en relación al método y comunicación de la HE, conteniendo la utilización de fuentes de datos, derivación de factores de conversión, establecimiento de limitaciones en los estudios y la comunicación certera de los resultados. Estos estándares son enormemente empleados por los socios de GFN y por otros evaluadores que conducen investigaciones y estudios sobre la HE.

### **3.2.1- Integración de los elementos que componen la Huella Ecológica**

Dentro de la HE se distinguen diferentes categorías de consumo, de tal modo que, para cada una de ellas, se estipulan los distintos requerimientos de superficie: hogar, alimentación, transporte, bienes de consumo, servicios, los cuales a su vez se pueden dividir en las subcategorías que se consideren oportunas.

#### **3.2.1.1 Carbono y energía**

Existe cierta tendencia a confundir el término Huella Ecológica (HE) con Huella de Carbono (HC). En años recientes diversas organizaciones y gobiernos están comenzando a usar éste último concepto para hacer referencia a las cantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que son emitidas, ligadas a un proceso o actividad. La HC cuantificada comúnmente en toneladas de  $\text{CO}_2$ , es la etapa inicial para el cálculo de la HC completa, que a su vez integra la HE total.

La HC transforma las toneladas de  $\text{CO}_2$  liberadas en la demanda que esto conlleva para la biocapacidad, expresada en términos del área total requerida

para absorber estas emisiones de CO<sub>2</sub>. La HC adiciona valor a los datos sencillos sobre emisiones de CO<sub>2</sub> de dos formas:

1. La HC transporta la magnitud de las emisiones a un marco significativo. La gran mayoría de las personas no sabe cómo interpretar 1,000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, pero pueden entender sin mucho esfuerzo que si 1,000 hectáreas globales son necesarias para absorber este carbono, pero sólo disponemos de la mitad, es un problema si tratamos de evitar que este producto de desecho se aglomere a nuestro alrededor.
2. La HE brinda una perspectiva general de aquellos sistemas que son susceptibles a revelar los efectos de derrame cuando la disminución de la demanda en un área conlleva al aumento en otra. Para entender esto sería bueno preguntarse si ¿cambiando el uso de los combustibles fósiles a biocombustibles disminuirá o aumentará la demanda total de la humanidad sobre la capacidad biológica del planeta? ¿Es más o menos efectivo incrementar el uso de biocombustibles que restituir bosques en tierras de cultivo? (Global Footprint Network, 2011).

### **3.2.1.2 Agua**

Aunque el agua dulce se considera un recurso natural que posee su propio ciclo a través de la biósfera, en sí misma no es un material hecho mediante un área biológicamente productiva, o un desecho absorbido por esta. Simplemente los ecosistemas no son capaces de crear agua tal como si lo hacen con la madera, carne o vegetales. Esto da como resultado que la Huella de una cierta cantidad hídrica no sea posible ser evaluada con valores de rendimiento como si se podría con una cantidad de madera o cultivo. Cuando son reportados números para la Huella Hídrica (HH), éstos generalmente hacen mención a la medida del total de litros del líquido que han sido consumidos, o bien, a la HE requerida para que una empresa que brinda servicios públicos provea una cantidad específica de agua.



Igualmente una HH es posible evaluarse en base al área de cuencas o de recarga necesaria para proporcionar tal volumen de agua. Sin embargo, el área obtenida de este cálculo, no puede ser incluida a la HE de otras área terrestres, debido a que esto daría pie a un conteo doble. Las cuentas de la HE plasman directamente la influencia de la disponibilidad hídrica sobre la biocapacidad de los ecosistemas.

Es viable hacer valoraciones de la cantidad de biocapacidad de necesitar del suministro de agua dulce, o de la capacidad perdida asociada a la utilización de agua para fines no bioproductivos. Puesto que es altamente específica la relación agua dulce/biocapacidad de acuerdo a la localidad, este análisis requeriría ser completado a una escala regional o local de acuerdo a cada caso (Global Footprint Network, 2011).

### **3.2.1.3 Biodiversidad**

Hay que tener en cuenta que la HE no es un indicador de la condición de la biodiversidad, el impacto sobre ésta proveniente de una actividad o proceso particular no afecta directamente el cálculo de la HE para dicha actividad.

Sin importar que no sea una medida directa de la biodiversidad, la HE apoya la evaluación y conservación de la misma mediante dos maneras. Primera, la HE es posible emplearla como un indicador a gran escala de las causas o presiones subyacentes que provocan la pérdida de biodiversidad. Segunda, la HE también puede ser útil para interpretar el consumo de cierta cantidad de material al área terrestre determinada local de donde fue sustraído. Posterior a esta lectura, indicadores y herramientas de evaluación suplementarios pueden ser utilizados para estudiar el impacto sobre la biodiversidad unida a la recolección de ese ecosistema (Global Footprint Network, 2011).

### **3.2.1.4 Recursos no renovables y contaminantes**

No es algo nuevo saber que estamos utilizando grandes cantidades de recursos no renovables (petróleo, minerales, etc.), al ser componentes extraídos fuera de los límites de la biósfera no cuentan con un valor de rendimiento que pueda valerle para traducir su fabricación en un área productiva. Por ende, una tonelada de carbón no posee una HE como si la tendría una tonelada de madera. A pesar de este hecho, hay una HE vinculada a la energía y a otros elementos utilizados en los procesos de extracción, refinamiento, procesamiento y transporte de estos recursos, que al sumarlos son expresados como la HE del mineral. En adición, cuando elementos del sector minero (mercurio y arsénico) se ponen en contacto con el medio natural, puede derivar en un efecto negativo y pérdida de productividad.

Los recursos combustibles fósiles no renovables se tratan de manera distinta puesto que representan material antiguo cuyo origen es biológico, y su combustión emite CO<sub>2</sub>, que forma parte de los ciclos materiales de la biósfera. Entonces la HC está definida como la cantidad de área necesaria para asimilar este elemento y prevenir su acumulación.

Otro caso serían los tóxicos y contaminantes generados por la actividad humana que no logran ser absorbidos por métodos puramente biológicos, tal es el caso de los materiales como el mercurio que al no ser elaborado mediante procesos biológicos ni absorbido por algún sistema biológico no cuenta con una HE definida (aunque por su extracción, procesamiento y transporte puede tener una HC). La liberación de estos materiales al medio ambiente pueden causarle daños, sin embargo esta degradación de biocapacidad puede evaluarse con la HE y localizar la actividad que originó la emisión del contaminante.

Las relaciones polución/daños ambientales son específicas para cada área, intensas en información y en la práctica difícil de calcular. No obstante, sin hacer ningún tipo de estimación, cualquier pérdida de biocapacidad a casusa de la emisión de contaminantes puede reflejarse en evaluaciones posteriores del área dañada (Global Footprint Network, 2011).

### 3.2.2. Cálculo de la Huella Ecológica y Biocapacidad

La principal limitación que encierra la HE es su fuente de información, es preferible evitar datos imprecisos o poco fiables pero para los casos de no contar con información local para los cálculos de las cuentas nacionales de la Huella Ecológica es aceptado apoyarse en información de las agencias afiliadas a las Naciones Unidas (tabla 3.3) como son Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT), United Nations Statistics Division (UN Comtrade) e International Energy Agency (IEA). Otras fuentes de datos incluirían estudios revisados de revistas y colecciones temáticas (Borucke. et al. 2013). Los resultados obtenidos se pueden reportar de acuerdo a el nivel de una categoría de producto, tipo de uso de tierra o agregados en un solo número (figura 3.1) siendo este último el formato de reporte más utilizado.

Tabla 3.3 Información de entrada para el cálculo de la HE y biocapacidad

Conjunto de datos	Fuente(s)	Descripción
Elaboración de productos agrícolas primarios	FAO ProdSTAT	Información sobre cantidades físicas (toneladas) de productos primarios elaborados en cada uno de los países considerados.
Producción de cultivos basados para alimentar a los animales	SUA/FBS de FAOSTAT (para datos generales de cultivos comercializados) FAO ProdSTAT (para datos de cultivos producidos específicamente para forraje)	Información sobre cantidades físicas (toneladas) de los alimentos, según el tipo de cultivos, disponibles para alimentar al ganado
Producción de semillas	FAO ProdSTAT	Información sobre cantidades físicas (toneladas) de semillas
Importación y exportación de productos agropecuarios básicos y derivados	FAO TradeSTAT	Información sobre cantidades físicas (toneladas) de productos importados y exportados
Importación y exportación de productos no agrícolas	COMTRADE	Información sobre cantidades físicas (kilogramo) de productos importados y exportados

Tabla 3.3 Continuación

Consumo de cultivos ganaderos	Calculado por GFN en base a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de la FAO para Ganadería primaria</li> <li>• Haberl et al. (2007)</li> </ul>	Datos sobre la alimentación a base de cultivos para el ganado (toneladas de materia seca por año), divididos en diferentes categorías de cultivos
Producción de insumos forestales primarios, así como la importación y exportación de los mismos y sus derivados	FAO ForeSTAT	Datos sobre cantidades físicas (toneladas y m <sup>3</sup> ) de productos (madera y leña) producidos, importados y exportados
Producción de insumos pesqueros primarios, así como la importación y exportación de los mismos y sus derivados	FAO FishSTAT	Datos sobre cantidades físicas (toneladas) de las especies de peces marinos, así como su importación y exportación
Emisiones de CO <sub>2</sub> por sector	IEA	Datos sobre la cantidad total de CO <sub>2</sub> emitido por
Zonas edificadas/infraestructura	Uso de combinación de fuentes de datos, en el siguiente orden de preferencia: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. CORINE Land Cover</li> <li>2. FAO ResourceSTAT</li> <li>3. Modelo de Zonas Agro-Ecológicas Globales (GAEZ)</li> <li>4. Global Land Cover (GLC) 2000</li> <li>5. Global Land Use (Base de datos del Centro para la Sostenibilidad) y la Global Environment (SAGE) de la Universidad de Wisconsin</li> </ol>	Áreas edificadas por tipo de infraestructura y país. A excepción de los datos extraídos de CORINE para los países europeos, el resto de las fuentes de datos sólo proporcionan los valores totales de la zona
Rendimientos de las tierras de cultivo	FAO ProdSTAT	Rendimiento promedio mundial de 164 productos agrícolas primarios
Factor de rendimiento nacional de las tierras de cultivo	Calculado por GFN basado en los rendimientos de las tierras de cultivo y el país sin cosechar porcentajes específicos	Factores de rendimiento para las tierras de cultivo
Rendimientos de las tierras de pastoreo	Chad Monfreda (comunicación personal), 2008. SAGE, Universidad de Wisconsin, Madison	Rendimiento mundial promedio para la producción de pasto.

Tabla 3.3 Continuación

Rendimientos pesquero	<p>Calculado por GFN en base a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Valor de la captura sostenible (Gulland, 1971)</li> <li>• Niveles tróficos de las especies de peces (Database Fishbase disponible en <a href="http://www.fishbase.org">www.fishbase.org</a>)</li> <li>• Datos sobre los factores de descarte, transferencia de eficiencia y contenido de carbono de los peces por tonelada de peso húmedo (Pauly y Christensen, 1995)</li> </ul>	Rendimientos promedios mundiales de las especies de peces (basados sobre el equivalente anual de producción marina)
Rendimientos forestales	<p>Rendimiento forestal mundial promedio calculado por GFN basado en incremento nacional anual neto de la biomasa obtenidos de dos fuentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de los Recursos Forestales Templados y Boreales - ERFTB (UNECE y FAO, 2000)</li> </ul>	Rendimiento forestal mundial promedio (basado en el incremento anual neto de la biomasa de los bosques).
Rendimiento de la tierra de captación de carbono	Calculado por GFN basado en datos sobre captación de carbono terrestre (IPCC, 2006) y el porcentaje de retención de mar (Khatiwala et al., 2009)	Capacidad de captación de carbono promedio mundial.
Factores de equivalencia (EQF)	<p>Calculado por GFN basado en datos sobre la cubierta terrestre e idoneidad agrícola obtenida del modelo GAEZ (IIASA y FAO, 2000).</p> <p>FAO ResourceSTAT (datos de cobertura de suelo)</p>	EQF para áreas de cultivos, pastos, bosques y marinas.

Fuente: Adaptada de Borucke. et al., 2013.

El cálculo de la HE idealmente se debe realizar siguiendo los Estándares de la Huella Ecológica, los cuales están pensados para asegurarse que los estudios son llevados a cabo consistentemente y de acuerdo a las mejores prácticas propuestas por la comunidad. Éstos Estándares cubren tanto el análisis de la HE como su comunicación y están diseñados para aplicarse a todos los estudios de huellas sub-nacionales incluyendo poblaciones, productos y organizaciones (Global Footprint Network, 2009).

Figura 3.1 Marco de contabilización de las cuentas nacionales de la HE

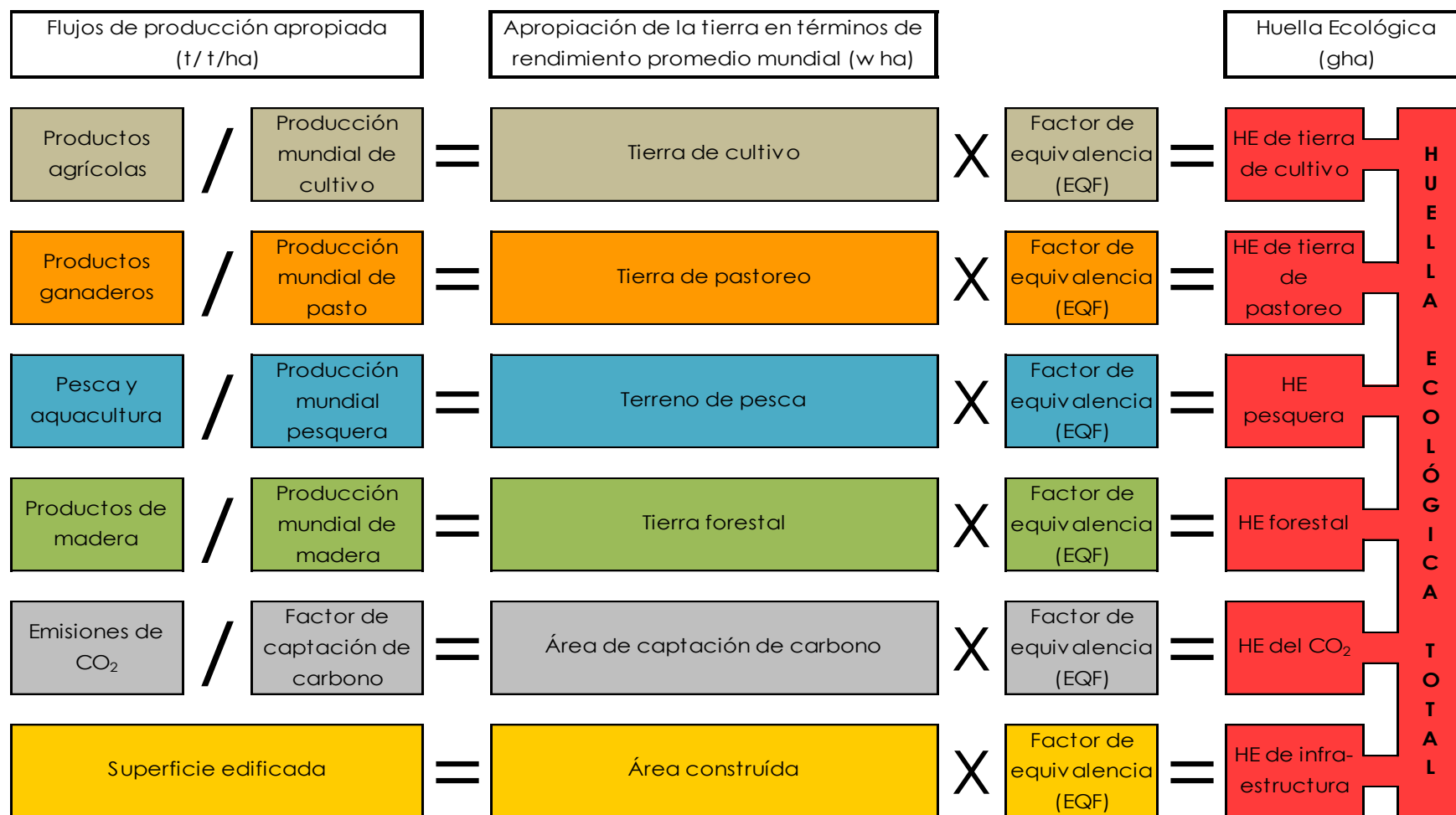
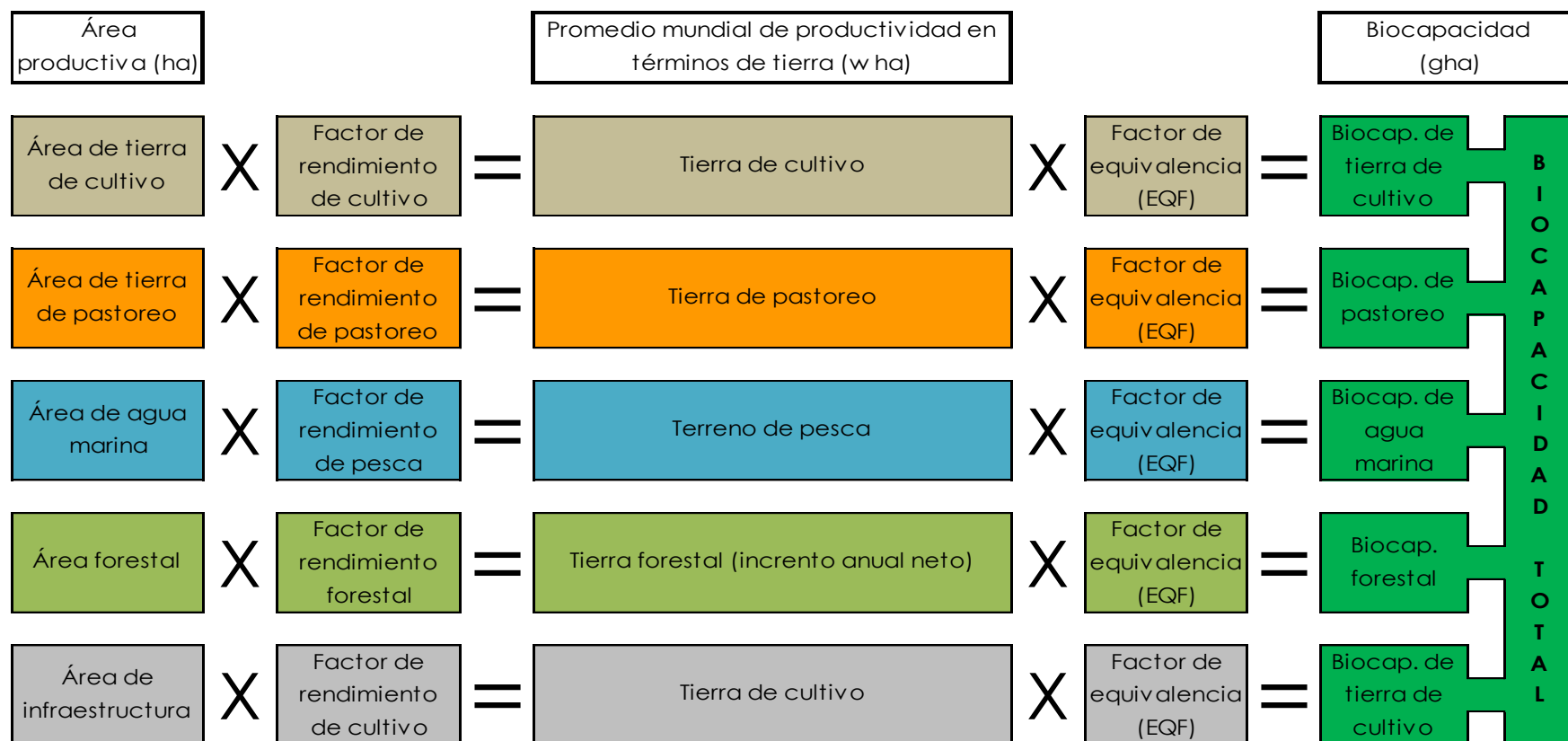


Figura 3.1 Continuación



Fuente: Adaptada de Borucke. et al., 2013.

B  
I  
O  
C  
A  
P  
A  
C  
I  
D  
A  
D  
T  
O  
T  
A  
L

Las mediciones de la HE miden la biocapacidad apropiada por medio de cinco tipos de uso de suelo diferentes. Esto discrepa con las seis categorías de demanda y la razón se debe a que los productos forestales y la captación de carbón entran en una misma clasificación (tierras forestales).

Para un país determinado, la HE de la producción ( $EF_P$ ), representa la demanda principal de la biocapacidad y se calcula como (fórmula 3.1):

$$EF_P = \sum_i \frac{P_i}{Y_{N,i}} \times YF_{N,i} \times EQF_i = \sum_i \frac{P_i}{Y_{W,i}} \times EQF_i \quad 3.1$$

Dónde:

$P$  = Cantidad de cada producto básico “ $i$ ” que es cosechado en el país (o  $CO_2$  emitido).

$Y_{N,i}$  = Rendimiento nacional anual promedio para la producción de productos básicos “ $i$ ” (o su capacidad de captación de carbono en los casos en que  $P$  sea  $CO_2$ ).

$YF_{N,i}$  = Factor de rendimiento específico para el país para la producción de cada producto “ $i$ ”.

$Y_{W,i}$  = Rendimiento mundial promedio de los productos básicos “ $i$ ”.

$EQF_i$  = Factor de equivalencia para el tipo de uso de la tierra produciendo productos “ $i$ ”.

A la variedad de productos subsecuentes también se le da seguimiento (Tabla 3.1), para los  $Y_w$  que tienen que ser calculados antes de la aplicación de la fórmula 3.1. Los bienes primarios y derivados están relacionados por las tasas de extracción de productos específicos ( $EXTR_D$ ) utilizada para calcular su rendimiento efectivo de la siguiente manera (fórmula 3.2):

$$Y_{W,D} = Y_{W,P} \times EXTR_D \quad 3.2$$

Dónde:

$Y_{W,D}$  y  $Y_{W,P}$  = Rendimiento promedio mundial para el derivado y el producto primario, respectivamente.



Hay casos de múltiples derivaciones simultáneas de un producto primario, en este caso podríamos caer en una doble contabilización. Para dar solución a esto, la HE del insumo primario debe ser compartida entre sus productos derivados de manera simultánea. La fórmula 3.3 es la manera generalizada de evaluar la tasa de extracción de un bien  $D$  derivado:

$$EXTR_D = \frac{TCF_D}{FAF_D} \quad 3.3$$

Dónde:

$TCF_D$  = Factor de conversión técnico del producto derivado.

$FAF_D$  = Factor de asignación de la huella

La fórmula 3.4 se aplica para encontrar el factor asignación de la huella de un producto derivado:

$$FAF_D = \frac{TCF_D \times V_D}{\sum TCF_i \times V_i} \quad 3.4$$

Dónde:

$V_i$  = Precio en el mercado de cada producto subsecuente.

Para determinar la biocapacidad (BC) que posee una nación (fórmula 3.5):

$$BC = \sum_i A_{N,i} \times YF_{N,i} \times EQF_i \quad 3.5$$

Dónde:

$A_{N,i}$  = Área bioproductiva disponible a nivel nacional para la producción de cada insumo “ $i$ ”.

$YF_{N,i}$  = Factor de rendimiento específico por nación para la producción de “ $i$ ”.

### 3.2.2.1 Factores de rendimiento

Los factores de YF son específicos de cada país y varían según el tipo de uso de tierra y el año. Son representativas de los factores naturales, como las diferencias en las precipitaciones o la calidad del suelo y las diferencias antropogénicas tales como las prácticas de gestión (Borucke. et al. 2013).

El YF es la relación del rendimiento promedio nacional y el mundial. Se calcula en términos de disponibilidad anual de productos útiles. Para cualquier tipo de uso de tierra ( $L$ ), se evalúa un factor de rendimiento nacional ( $YF_L$ ) con la fórmula 3.6.

$$YF_L = \frac{\sum_{i \in U} A_{W,i}}{\sum_{i \in U} A_{N,i}} \quad 3.6$$

Dónde:

$U$  = Conjunto de todos los productos primarios útiles.

$A_{W,i}$  y  $A_{N,i}$  = Áreas nacionales requeridas para proporcionar anualmente la cantidad disponible de producto “ $i$ ” en el mundo y los rendimientos nacionales, respectivamente.

Por lo tanto es necesario calcular esas áreas nacionales (fórmula 3.7):

$$A_{N,i} = \frac{P_i}{Y_{N,i}} \quad y \quad A_{W,i} = \frac{P_i}{Y_{W,i}} \quad 3.7$$

Dónde:

$P_i$  = Crecimiento nacional anual total del producto “ $i$ ”

$Y_{N,i}$  y  $Y_{W,i}$  = Rendimientos nacionales y mundiales para el mismo producto, respectivamente.

Con la salvedad de las tierra de cultivo, todos tipos de uso de suelo incluidos en la las cuentas de la HE se supone que proporcionan un único producto primario humano útil “ $i$ ”. La fórmula 3.8 se simplifica para esos tipos de uso de suelo:

$$YF_L = \frac{Y_{N,i}}{Y_{W,i}} \quad 3.8$$

Dada la dificultad de asignar un rendimiento a la superficie edificada, se asume que YF es el mismo que para las tierras de cultivo Por falta de datos detallados

globales, se presume que las zonas inundadas por los embalses hidroeléctricos previamente han tenido productividad mundial promedio. El YF para la Huella de Carbono se supone que sea el mismo que el de las tierras forestales, debido a la limitada disponibilidad de datos sobre la captación de carbono de los otros tipos de uso del suelo. A todas las aguas marinas se les asigna un YF de uno, a causa de falta de un conjunto detallado de datos mundiales del ramo.

### **3.2.2.2 Factores de equivalencia**

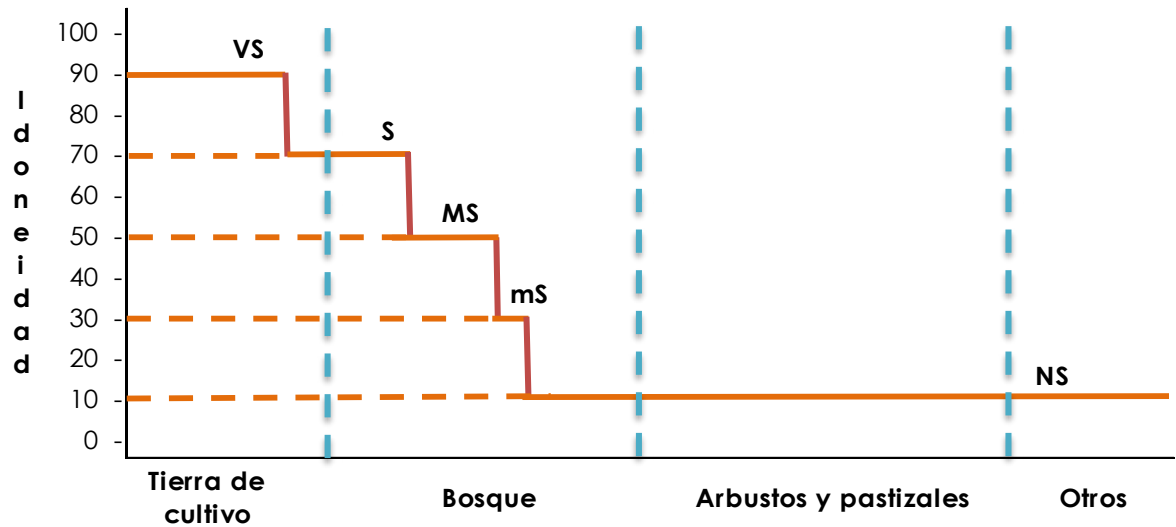
Con el objetivo de combinar la HE o la biocapacidad de los diferentes tipos de uso del suelo, se requiere de un segundo coeficiente (Borucke. et al. 2013). Es aquí donde entran en juego los EQF, previamente descritos y que varían según su tipo de uso de suelo y el año.

La razón fundamental detrás los cálculos de EQF es ponderar las distintas áreas de la tierra en términos de su capacidad inherente para crear recursos biológicos que sirvan al hombre. El criterio de ponderación no es la cantidad real de la biomasa producida, sino lo que cada hectárea podría ofrecer.

Los EQF se calculan cada año utilizando actualmente los índices de idoneidad del Modelo de Zonas Agro-Ecológicas Globales combinados con la información sobre las áreas reales de tierra de cultivo, forestal y de pastoreo de FAOSTAT (Borucke. et al. 2013). Este modelo divide toda la tierra a nivel mundial en cinco categorías (figura 3.2), basándose en la potencial productividad del cultivo calculado. Toda la tierra se le asigna un índice cuantitativo de idoneidad:

- Muy adecuado (VS) – 0.9
- Adecuado (S) – 0.7
- Moderadamente adecuado (MS) – 0.5
- Pobremente adecuado (mS) – 0.3
- No adecuado (NS) – 0.1

Fig. 3.2 Representación esquemática para la evaluación del EQF



Fuente: Adaptada de Borucke. et al., 2013.

### 3.2.3 Cálculo de la Huella Ecológica de un individuo

La HE de una persona es determinada teniendo en cuenta todos los materiales biológicos que ha consumido y la totalidad de sus desechos generados en un año determinado. Todos estos componentes posteriormente pasan a ser traducidos, de manera individual, a un equivalente de hectáreas globales por.

Para hacerlo posible, la cantidad de material consumido por el individuo (toneladas al año) se tiene que dividir entre el rendimiento de un área de terreno o mar específico (toneladas anuales por hectárea) de donde fue cosechado o recogido, o donde el material de desecho fue absorbido.

Una vez obtenido el número de hectáreas resultantes de este cálculo son convertidas a hectáreas globales utilizando los factores de rendimiento y equivalencia. La sumatoria de las hectáreas globales requeridas para soportar el consumo de recursos y su consecuente absorción de desechos de esa persona es su HE.

### **3.2.4 Cálculo de la Huella Ecológica de un grupo de personas**

La HE de un grupo de personas, que bien podría interpretarse como una ciudad o una nación, es sencillamente la suma de las HE de todas las personas residentes de la ciudad o nación en cuestión. También es posible elaborar una HE de la producción nacional, la cual conjunta la HE de todos los recursos extraídos y desechos generados dentro de los límites fronterizos que presenta el área de estudio.

### **3.2.5 Huella Ecológica de la producción de un bien o servicio**

Para este caso, la HE representativa de una actividad, como la producción de un bien o un servicio, se calcula al sumar la HE de todo el material consumido y desechos generados durante esa actividad. Al estimar la HE de una entidad empresarial u organización. Lo más importante debe ser definir claramente todos y cada una de las actividades que serán incluidas dentro de la organización.

Una actividad con un tiempo específico (inicio y un fin definido), como la elaboración de un producto individual, requiere un tipo de unidad diferente. Durante su fabricación, no se necesita un flujo continuo de bienes y servicios, sino un número dado de hag en un período de tiempo establecido. Producir una silla, un tomate o un libro, los cuales requieren el uso de un área específica por un período de tiempo finito, tendrán una HE que se reporta adecuadamente en "hectárea-años globales".

Para un producto cuyo consumo se amortigua mediante el paso del tiempo, como los materiales para la construcción de un edificio, el producto comienza con una HE total medida en hectárea-años globales. Consecuentemente, esta HE total se divide a través de la vida útil del edificio, por lo que la HE de un producto durable en cualquier año se expresa en hectárea-años globales por año, o hag.

No existen casos de contabilidad de la HE donde el uso de “hectáreas globales por año” sea correcto.

### 3.2.6 Cálculo de la Huella Ecológica de un consumidor

El papel que desempeña un primer consumidor es de suma importancia debido a que con él es donde inicia el rastreo a los productos para llevar a cabo la contabilización de la HE.

Desde un enfoque del consumidor en las Cuentas Nacionales de la Huella, todos los procesos de fabricación se basan en cierta medida en el uso de la biocapacidad para proporcionar las entradas de material y eliminar los desechos en varios puntos de la cadena de producción. Por lo tanto, todos los productos llevan consigo una HE encarnada y los flujos comerciales internacionales pueden verse como los flujos de demanda encarnada por la biocapacidad (figura 3.3).

Con el propósito de llevar un seguimiento (directo e indirecto) de la biocapacidad necesaria para apoyar los patrones de consumo de las personas y así poder asignar correctamente las HE de los bienes comercializados a los consumidores finales, las Cuentas Nacionales de la Huella emplean un enfoque basado en el consumidor, para cada tipo de uso de la tierra, la Huella Ecológica del Consumo ( $EF_C$ ) se calcula a través de la fórmula 3.9. Para cada producto que haya sido comercializado importándolo o en su defecto, exportándolo,  $EF_I$  y  $EF_E$  son calculados siguiendo la fórmula 3.1.

$$EF_C = EF_P + EF_I - EF_E \quad 3.9$$

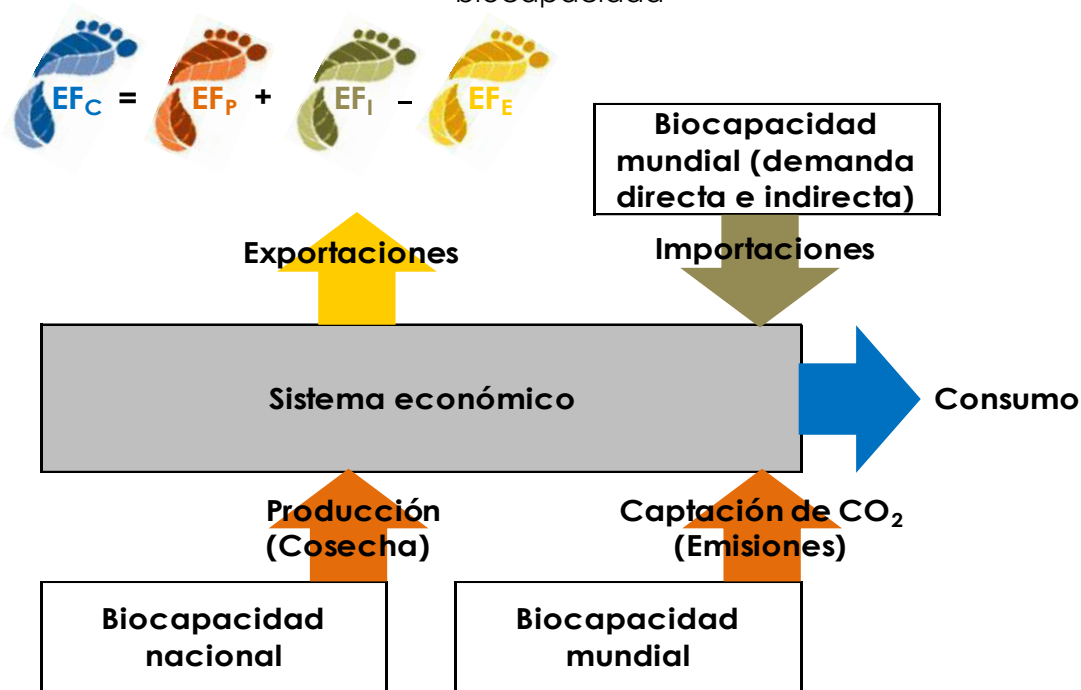
Dónde:

$EF_P$  = HE de la producción

$EF_I$  = HE que conllevan los productos importados

$EF_C$  = HE presentes en los insumos exportados

Figura 3.3 Esquematización de la demanda (directa e indirecta) de la biocapacidad



Fuente: Modificada de Borucke. et al., 2013.

### 3.2.7 Tipos de uso de la tierra en la Huella Ecológica

De una manera u otra, todas las actividades humanas utilizan tierra biológicamente productiva y/o zonas pesqueras. Debido a esto, es relevante conocer los tipos de éstas y cómo es que forman parte de la HE.

#### 3.2.7.1 Tierras de cultivo

Consisten en el área requerida para cultivar todos los productos agrícolas, incluidos alimentos para ganado y pescado, plantas oleaginosas y caucho. Es el tipo de suelo de mayor bioproductividad de todos los incluidos en las cuentas de HE. Su cálculo se realiza a partir de datos sobre la producción, importación y exportación de productos agrícolas primarios y derivados. La huella de cada tipo

de cultivo se determina como el área de las tierras de cultivo que sería necesaria para producir la cantidad cosechada en base al rendimiento promedio mundial.

### 3.2.7.2 Tierras de pastoreo

Este rubro mide el área de pastizales usados, además de los cultivos de alimentos para apoyar la ganadería. La huella de las tierras de pastoreo se calcula con la ecuación. 3.1. La demanda total de pasto ( $P_{GR}$ ), es la cantidad de biomasa necesaria para el ganado lo cual se contabilizan, según la fórmula 3.10.

$$P_{GR} = TFR - F_{Mkt} - F_{Crop} - F_{Res} \quad 3.10$$

Dónde:

$TFR$  = Requerimiento de alimento total calculado.

$F_{Mkt}$  = Cultivo general comercializado.

$F_{Crop}$  = Cultivos específicamente para forraje.

$F_{Res}$  = Residuos de cultivo

### 3.2.7.3 Zonas pesqueras (caladeros)

Este componente es evaluado en base a la producción primaria anual que es necesaria para mantener en equilibrio a la especie marina que se pesca. Este requisito ( $PPR$ ), es la relación volumen capturado entre producción primaria de mantenimiento (en base a su nivel medio trófico) y se calcula siguiendo la fórmula 3.11.

$$PPR = CC \times DR \times \left(\frac{1}{TE}\right)^{(TL-1)} \quad 3.11$$

Dónde:

$CC$  = Contenido de carbono en la biomasa de peces en peso húmedo.

$DR$  = Tasa de descarte de las capturas incidentales.

$TE$  = Eficiencia de transferencia de biomasa entre los niveles tróficos.



TL = Nivel trófico de la especie marina es cuestión

La estimación de la producción primaria anual disponible que se utiliza para calcular los rendimientos marinos se basa en las estimaciones de las cosechas anuales sostenibles de 19 grupos de especies acuáticas diferentes (Borucke. et al., 2013). Estas cantidades se convierten en equivalentes de producción primaria utilizando la fórmula 3.11, y la suma de ellos se toma como el requisito de la producción primaria total que las pesquerías mundiales pueden extraer sosteniblemente. Por lo tanto la necesidad de producción primaria extraíble total de manera sostenible ( $PP_S$ ), se determina de la siguiente manera (fórmula 3.12):

$$PP_S = \sum (Q_{S,i} \times PPR_i) \quad 3.12$$

Dónde:

$Q_{S,i}$  = Captura sostenible estimada para el grupo de especies "i".

$PPR_i$  = Requisito de producción primaria que corresponde al nivel trófico promedio del grupo de especies "i".

En consecuencia la producción marina mundial ( $Y_M$ ), hablando en términos de  $PPR$  se da mediante la fórmula 3.13.

$$Y_M = \frac{PP_S}{A_{CS}} \quad 3.13$$

Dónde:

$PP_S$  = Captura mundial sostenible proveniente de la ecuación 3.12

$A_{CS}$  = Área de la plataforma continental mundial

#### **3.2.7.4 Zonas boscosas**

La HE de los terrenos forestales cuantifica la producción anual de leña y madera para abastecer los insumos que empleen estos materiales. El rendimiento que se utiliza para estas áreas es el aumento neto anual de madera comercializable por hectárea. Para su correspondiente evaluación se hace uso de información de la

Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE), Evaluación de Recursos Forestales y el Suministro Mundial de Fibra, ambos de la FAO.

### **Tierra construida**

La zona construida se cuantifica en base al área de tierra cubierta por infraestructura humana. El suelo urbanizado siempre posee una biocapacidad igual a su HE, puesto que ambas cantidades capturan la biocapacidad perdida por la ocupación de infraestructura física.

### **Huella de Carbono**

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se libera a partir de las actividades humanas y ciertos fenómenos naturales. Diversos tipos de ecosistemas tienen la capacidad de capturar  $\text{CO}_2$  a largo plazo, sin embargo, dado que la mayor captación de este elemento se da en los bosques, y para evitar sobreestimaciones, se supone que forma parte de la zona boscosa (en la metodología para el cálculo de la HE). Por ende, los bosques para obtener madera y leña no están separados de los bosques para la captura de carbono.

La tierra de captación para alojar la Huella de Carbono, es el único tipo de suelo incluido en las cuentas nacionales de HE que se dedica exclusivamente al seguimiento de un producto de desecho: dióxido de carbono. Además de ser únicamente para el que no está actualmente definido de manera explícita.

## 4.- HUELLA DE CARBONO

### 4.1.- Introducción

La preocupación internacional por las consecuencias adversas del cambio climático ha venido en franco crecimiento, lo que ha impulsado a organizaciones e instituciones a pulir sus conocimientos sobre los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y su dinámica. Dentro de este marco, la Huella de Carbono (HC) se vuelve un indicador con amplio reconocimiento internacional para entender dicha dinámica, lo que conlleva a no sólo conocerla sino también a medirla y divulgarla como un componente más en la toma de decisiones. La HC nos permite identificar rutas para controlar, reducir o mitigar las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), así como su impacto, teniendo su alcance en el comercio de bienes y servicios reconocimiento, en específico de países comprometidos a reducir sus emisiones.

A menudo la definición más aceptada de la HC se describe como una medida de la cantidad total de las emisiones exclusivamente de  $\text{CO}_2$  causadas directa o indirectamente por una actividad o su acumulación en las etapas de vida de un producto (Wiedmann y Minx 2008), pese a su aparente sencillez y su amplia difusión, ésta aún no ha sido claramente definida creando confusión en cuanto a lo que realmente significa. Su espectro de definiciones (tabla 4.1) va desde un mirada simplista que toma en cuenta únicamente las emisiones directas de  $\text{CO}_2$ , a otras algo más complejas, relacionadas a la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) completo de las emisiones de GEI, contemplando la elaboración de las materias primas, el destino final del producto y sus respectivos embalajes. Las definiciones existentes en la literatura se centran en el  $\text{CO}_2$  como el principal eje de análisis, siendo la gran diferencia entre éstas, además del alcance de la HC, la inclusión de los demás GEI (Schneider y Samaniego, 2009).

Tabla 4.1 Distintas definiciones de Huella de Carbono

Fuente (año)	Concepto
British Petroleum (2006)	"La huella de carbono es la cantidad emitida de dióxido de carbono debida a sus actividades diarias".
British Sky Broadcasting (Patel 2006)	La huella de carbono se calculó mediante "la medición de las emisiones de CO <sub>2</sub> equivalentes de sus instalaciones, vehículos de la empresa, viajes de negocio y residuos vertidos (Patel 2006)".
Carbon Trust (2007)	"...una metodología para estimar las emisiones totales de GEI en carbón equivalente de un producto a través de su ciclo de vida, desde la producción de materia prima utilizada en su fabricación hasta la disposición del producto final (excluyendo las emisiones en uso)". "...una técnica para identificar y medir de las emisiones de los GEI individuales de cada actividad dentro de una etapa del proceso de la cadena de suministro y el marco para la atribución de éstos a cada producto de salida (nosotros, Carbon Trust) nos referiremos a esto como la huella de carbono de un producto (Carbon Trust, 2007, p.4)".
Energetics (2007)	"...la totalidad de las emisiones de CO <sub>2</sub> directas e indirectas causadas por sus actividades de negocios".
ETAP (2007)	"... la "huella de carbono" es una medida del impacto que las actividades humanas tienen sobre el medio ambiente en términos de la cantidad de gases de efecto invernadero producidos, medidos en toneladas de CO <sub>2</sub> ".
Global Footprint Network (2007)	"La demanda de biocapacidad necesaria para capturar (por fotosíntesis), el CO <sub>2</sub> procedentes de la combustión de combustibles fósiles."
Grub and Ellis (2007)	"Una huella de carbono es una medida de la cantidad de CO <sub>2</sub> emitido a través de la combustión de combustibles fósiles. En el caso de una organización empresarial, es la cantidad de CO <sub>2</sub> emitida ya sea directa o indirectamente como resultado de sus operaciones diarias. También podría reflejar la energía fósil representada en un producto o bien de mercado alcanzando".
Parliamentary Office of Science and Technology (POST 2006)	"Una huella de carbono es la de cantidad total de CO <sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, emitidos durante el ciclo de vida completo de un proceso o producto. Se expresa en gramos de CO <sub>2</sub> equivalentes por kilovatio hora de la generación (gCO <sub>2</sub> eq/kWh) y da cuenta de los diferentes efectos del calentamiento global de otros GEI".

Fuente: Wiedmann y Minx, 2008.

La variable más importante es la asociada a la consideración de los gases. Es normal que dentro del indicador de HC se incluyan las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero comúnmente no está claro si se considera únicamente el CO<sub>2</sub> o el resto de GEI. En caso de considerar el conjunto de éstos se recomienda hablar de "Huella Climática" (Pon y Pon, 2009). En consecuencia, en ciertos casos, la HC se expresa en toneladas de CO<sub>2</sub> y en otros en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> si se incluyen todos los GEI.

La relevancia de medir el CO<sub>2</sub> radica en el hecho de que es el principal elemento que es emitido por causa de las actividades humanas, también es considerado un producto secundario de ciertos procesos químicos, por lo tanto es el mayor contribuyente del problema denominado efecto invernadero (calentamiento global).

Entre 1970 y 2004, estas emisiones, han aumentado en un 70% y para el caso del CO<sub>2</sub> se han crecido entre en un 80% y representó el 77% de las emisiones totales de GEI antropogénicos en 2004 (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). En general, actualmente llega a representar más del 80% de las emisiones de GEI en países industrializados y se estima que las acciones humanas aportan 6.1 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera cada año, siendo dicha cantidad más del doble de lo que la naturaleza puede neutralizar.

Esto se logra durante el proceso de fotosíntesis, las plantas remueven el carbono presente en la atmósfera almacenándolo en sus tejidos. Antes de ser emitido de nuevo a la atmósfera, el carbono absorbido reside en una serie de "depósitos de carbono", como pueden ser la biomasa superficial (vegetación) en bosques, tierras de cultivo y otros ambientes terrestres; biomasa subterránea (raíces de las plantas); y productos a base de biomasa (madera). En algunos de estos depósitos, el carbono puede llegar a permanecer por períodos largos, a veces durante siglos. Un aumento en la cantidad de carbono capturado en estos depósitos representa una remoción neta de carbono de la atmósfera; un descenso en dicha cantidad representa una adición neta de carbono a la

atmósfera (World Business Council for Sustainable Development y World Resources Institute, 2005)

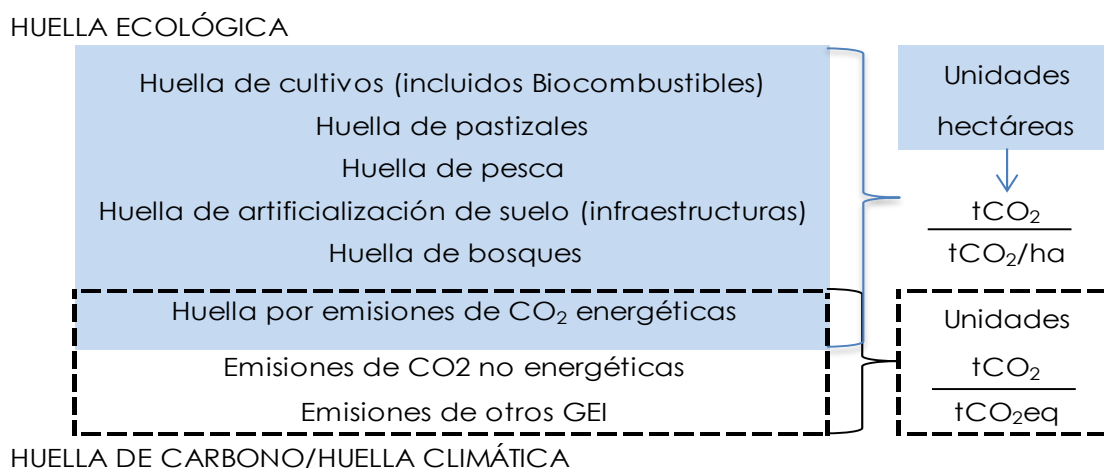
En años recientes, el uso de la HC ha venido posicionándose como un indicador de mayor importancia, paralelamente al auge de la problemática del cambio climático e implantación de políticas para revertir esta situación a distintos niveles. Sin embargo, el hecho de simplificar el impacto ambiental del consumismo en términos de emisiones de GEI, no releva el riesgo de obviar otros aspectos incluidos por el consumo, como son el uso y apropiación de los recursos naturales por encima de la capacidad de carga de territorio y del planeta (Pon y Pon, 2009).

#### **4.1.1 Huella de Carbono y Huella Ecológica**

La HE se compone de sub-huellas, en función de su impacto directo en el cambio climático se determina la relevancia de cada una, en ese sentido la HC cuya participación en la HE alcanza casi el 50% (Schneider y Samaniego, 2009), es perfila como la de mayor relevancia, lo que implica que no sólo es importante su estudio y medición sino también conocerla para poder comprenderla en todas su dimensiones.

Ambos conceptos son análogos, siendo indicadores sintéticos cuyo fin es evaluar el impacto asociado a un determinado consumo. En el caso de la HC, este impacto se limita a la valoración de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La HE incluye esta valoración y le integra otras pertenecientes a los recursos naturales empleados en la satisfacción de este consumo. Sólo en aquellos casos en los que la HC calculada aúna las emisiones no energéticas de CO<sub>2</sub> (asociadas a procesos industriales sin combustión) y amplía su alcance al conjunto de GEI (Huella Climática), nos encontramos con componentes que no están integrados en la HE (figura 4.1).

Figura 4.1 Elementos y vinculación entre HC y HE



Fuente: Adaptada de Pon y Pon, 2009

La HC es presentada en toneladas de CO<sub>2</sub> o toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, cuando incluimos los GEI. No así, el componente de la HC que forma parte de la HE, el cual termina por expresarse en hectáreas. Éstas son el producto final de dividir el resultado inicial entre los índices de fijación de CO<sub>2</sub>, por unidad de superficie de bosque ( $tCO_2/ha$ ).

Así mismo, en algunas evaluaciones la HC puede ser un componente activo presente en los estudio de la HE. Cuando es el caso, la HC se expresa en unidades de superficie (ha), que representan el área de zona boscosa requerida para captar el CO<sub>2</sub>.

En cuanto a alcances y limitaciones se trata, tanto para la HC como para la HE son los mismos (territorio, organización, producto, individuo), aunque éste último indicador aporta un valor añadido a escala territorial e individual. Considerando esta relación, se ve previsible y oportuno, que el uso de la HC se vaya generalizando en los próximos años a diferentes escalas y aplicaciones. Aunque sería oportuno que los estudios realizados, sobre todo en la escala territorial, se puedan completar con la HE (y por extensión la HH). Esto conllevaría obtener una evaluación más completa, no sólo del conjunto de impactos causados por el consumo, sino también de las propias políticas de cambio climático.

## 4.2.- Metodología

La HC puede verse desde diferentes enfoques y niveles: ser parte o no de la HE; integrar en su evaluación todos GEI o sólo el CO<sub>2</sub> emitido; y hasta considerarlo como una parte de un concepto más amplio que es LCA. Su cálculo se deriva de distintas iniciativas clave a nivel mundial que se han implementado en países punteros en este tópico (tabla 4.2) y en algunos casos los más aquejados por problemas de contaminación. A futuro se espera que de estas iniciativas se deriven acciones mandatorias y legales que establezcan la obligatoriedad respecto a la información sobre la HC y en cómo será entregada a la ciudadanía. En otros casos, las propias empresas serán quienes impondrán la exigencia de informar respecto de la HC a los integrantes de su cadena productiva (Schneider y Samaniego, 2009).

La conjunción del interés por la competitividad, las emisiones y la HC ha llevado a diferentes organizaciones a proponer modelos para evaluar e informar los impactos de los GEI en productos y servicios. Los de mayor importancia, el gobierno los patrocina y buscan facilitar la definición de estándares nacionales. En cambio otras tienen por objetivo reducir las emisiones derivadas de sus procesos productivos o se enfocan sólo en presentar información ambiental de mayor calidad a clientes y gobiernos (Schneider y Samaniego, 2009). En años recientes se han venido desarrollando un sinnúmero de metodologías para la medición de emisiones de GEI, según tres lógicas de elaboración:

- a) Guías generales: normas ISO que representan estándares de marcos metodológicos de referencia para el cálculo de CO<sub>2</sub>
  - Norma ISO 14040, sobre Gestión Ambiental
  - LCA; BS ISO 14064-1:2006, sobre GEI
  - Parte I: Especificación con orientación, a nivel de organización, para la cuantificación y divulgación de las emisiones y de la remoción de GEI
- b) Guías específicas: para la contabilidad, cálculo y monitoreo de GEI
  - PAS 2050



- Bilan Carbone®
- Protocolo de GEI (GHG Protocol)

c) Herramientas de cálculo para actividades específicas como el transporte o el comportamiento del consumidor.

Es importante resaltar que la HC de puede aplicar a múltiples conceptos, siendo los principales: una empresa, sector o administración (Hale *et al*, 2011; Departamento de Economía Agraria y Green Solution, 2011) un área delimitada (Tortajada, 2009; Álvarez-Uría y De la Cruz-Leiva, 2009), un bien o servicio (Betancourt, 2012), algún evento (Consultoría Tú Transformas, 2011) o una persona. Las metodologías pueden estar especializadas en uno o más de estos conceptos, o cubrir el espectro completo de dichos conceptos.

Tabla 4.2 Iniciativas fundamentales a nivel mundial para la medición de la HC

País	Iniciativa	Fecha	Enfoque
Alemania	Proyecto piloto Product Carbon Footprint (PCF)	Desde 2008	Proyecto piloto gestionado por un consorcio de empresas, sobre la HC en productos y servicios (10 empresas, 15 etiquetas en la fase 1 de 2008).
EE.UU.	Clean Energy and Security Act	Desde 2009 (aún por ratificar)	En la sección 274 de la legislación solicita a la EPA que diseñe un programa de información voluntaria de carbón.
	Iniciativa de sostenibilidad Wal Mart	Desde 2007	Líder en pruebas de HC de los productos de 40 proveedores.
Francia	Bilan Carbone®	Desde 2002	Soporte del gobierno para probar etiquetas de carbono (cerca de 3,000 productos etiquetados en 2009).
	Proceso del Grenelle de l'environnement	Desde 2007	Agenda medioambiental del gobierno (apoyo a Bilan Carbone®)
Japón	Guías del Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) para HC en productos	Desde 2009	Guía elaborada por el gobierno para el cálculo de la HC en productos y etiquetado (incluye reglas de categorías por productos, PCR).

Tabla 4.2 Continuación

Nueva Zelandia	Pastoral GHG Research Consortium	Desde 2004	Consorcio nacional académico y comercial que da soporte a la medición y reducción de la HC (mitigación para actividades de pastoreo).
	Estrategia neozelandesa de GEI	Desde 2007	Estrategia nacional para el cálculo y la reducción de la HC.
Reino Unido	Tesco	Desde 2007	Líder en las pruebas de etiquetado en los supermercados, basadas en la metodología propuesta por el PAS 2050 (alrededor de 100 productos).
	PAS 2050	Desde 2008	Guías elaboradas con el apoyo del gobierno para la HC en productos (utilizada en Reino Unido y otros lugares).

Fuente: Modificada de Schneider y Samaniego, 2009.

Dentro de los marcos metodológicos destacan aquellos que poseen cierto reconocimiento e influencia sobre los avances actuales. La tabla 4.3 menciona y describe brevemente el objetivo y orientación de estos. Como se mencionó anteriormente, la unidad de la HC varía según la entidad de que se trate. La HC de las personas y procesos dinámicos se calcula cada determinado tiempo, que por lo general es cada año. Las emisiones de eventos como conferencias, ferias, acontecimientos deportivos, etc., se contabilizan sólo una vez.

En cambio en ciertas ocasiones habrá una combinación de ambos, como la HC de un edificio, dónde se determinará durante su fase de construcción y posteriormente se necesitarán evaluaciones periódicas a lo largo de su operación. Por lo tanto, lo importante es que la dimensión de tiempo deba ser mencionada a fin de indicar claramente el lapso de tiempo durante el cual las emisiones se han estimado, o si se trata de un suceso con emisiones de una sola vez (Pandey et al., 2010).

Pon y Pon (2009) determinan que, en función de la escala de aplicación de estudio, el cálculo de la HC puede hacer uso de una metodología u otra. Por consiguiente, las metodologías basadas en una LCA son idóneas para la evaluación de la HC a un nivel ciudadano, producto y organizaciones (con correspondientes cadenas de proveedores). Por otro lado, cuando la realización del análisis efectuado se lleva a escala poblacional de un territorio (región o país), las metodologías más idóneas suelen ser las basadas en el análisis "*input-output ambiental*" (IOA) y el análisis de flujos de materiales (AFM) (figura 4.2).

Tabla 4.3 Principales metodologías y herramientas para el cálculo de la HC

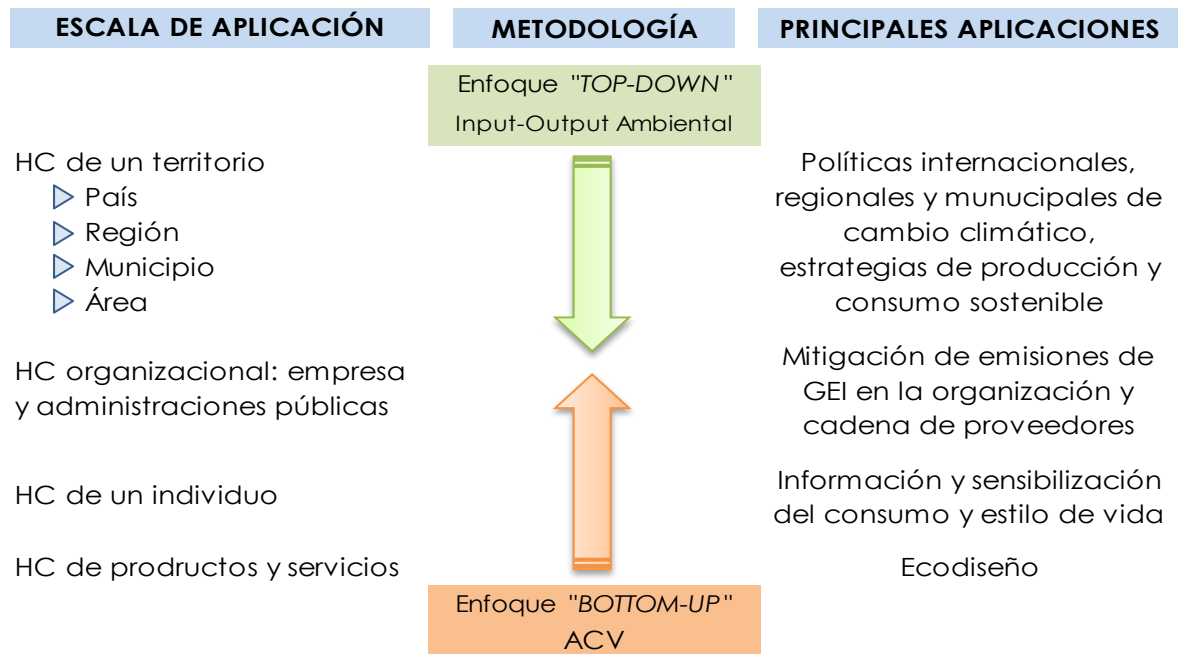
Nombre	Desarrollador	Orientación	Objetivo	Conformidad	Conteo de emisiones	Reducción	Compensación	Otros impactos	Gases considerados	Escala	Alcance
GHG Protocol	World Business Council for Sustainable Development /World Resources Institute	Privado/ Sociedad civil	Establecer herramientas para medición de GEI	ISO 14064-14065	Si	Poca	No	No	6 GEI Kioto	Sitio/Territorio/ Producto	Directas + Indirectas
Bilan Carbone®	ADEME	Público	Proveer herramienta con la evaluación de la HC	ISO 14064-14065/ GHG Protocol	Si	Si	No	No	Todos los GEI	Sitio/Territorio/ Producto	Directas + Indirectas
PAS 2050	Carbon Trust/ British Standard Institute	Público	Proveer herramienta con la evaluación de la HC	ISO 14064-14065/ GHG Protocol	Si	No	No	No	Todos los GEI	Producto	Directas + Indirectas
PAS 2060	Carbon Trust/ British Standard Institute	Público	Proveer herramienta con la evaluación de la HC y compensaciones de emisiones no reduciibles	ISO 14064-14065/ GHG Protocol	Si	Si	Si	No	Todos los GEI	Sitio/Territorio	Directas + Indirectas
CARROT	Estado de California	Público	Ayudar a empresas y organizaciones a realizar inventario de GEI, fijar año de referencia y reducciones	GHG Protocol	Si	Si	No	No	6 GEI Kioto	Sitio/Territorio	Directas + Indirectas
Carbone Impact	Inotfi	Privado	HE de exportación/importación	Bilan Carbone®	Si	Si	No	No	CO <sub>2</sub>	Transporte	Directas + Indirectas
Emissions Logic	Carbonsim PTY Ltd.	Privado	Inventario de GEI con adaptación a distintos estándares	EU ETS/GHG Protocol/US DOE 160 5b/UK CCA/IPPC	Si	Si	Si	Si	6 GEI Kioto, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub>	Sitio/Territorio	Directas + Indirectas
Carbon Management	Carbon Trust	Público	Inventario y reducción		Si	Si	Si	No	6 GEI Kioto	Sitio/Territorio/ Producto	Directas + Indirectas
CarMan/ CarMon	Ecofys	Privado	Inventario, análisis de costo/eficiencia de medidas de reducción	UE ETS	Si	Si	Si	No	CO <sub>2</sub>	Sitio/Territorio	Directas + Indirectas
Emission Manager	Envirosoft Products Inc.	Privado	Inventario de GEI para productores de gasolina y gas	Inventario Nacional Canadiense	Si	No	No	Si	6 GEI Kioto, CO	Sitio	Directas
Green-house Gas Suite	Environmental Software Providers	Privado	Inventario y gestión en bolsas de carbono	ISO 14001/UE ETS/US 1605b, GRI	Si	No	Si	No	6 GEI Kioto	Sitio	Directas + Indirectas

Tabla 4.3 Continuación

GEMS	ICF International	Privado	Inventario y reducción (enfocado al sector petrolero)		Si	Si	Si	No	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>	Sitio	Directas + Indirectas
GHG Indicator	United Nations for Environmental Program	Público	Inventario de emisiones de GEI	GHG Protocol	Si	No	No	No	6 GEI Kioto	Sitio	Directas + Indirectas
Greenware's Greenhouse	Greenware Environmental System Inc.	Privado	Inventario y monitoreo de emisiones GEI	GHG Protocol	Si	No	No	No	CO <sub>2</sub>	Sitio	Directas + Indirectas
GRIP	IK Environmental Agency/ Tyndall Centre	Público	Inventario en territorios	IPCC	Si	Si	No	No	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFC, PFC	Territorio	Directas
CO <sub>2</sub> Navigator	NTT Data Corporation	Privado	Inventario para el marco legal japonés		Si	Si	No	No	GEI Kioto	Sitio/Territorio	Directas + Indirectas
SAP Environmental	SAP/ Technidata	Privado	Monitoreo de emisiones GEI	UE ETS	Si	No	No	No	CO <sub>2</sub>	Territorio	Directas + Indirectas
SOFIEM	PE International	Privado	Monitoreo financiero de emisiones	UE ETS	Si	Si	Si	No	CO <sub>2</sub>	Sitio	Directas + Indirectas
Carbon View	Supply Chain Consulting	Privado	Inventario, monitoreo y gestión financiera		Si	Si	Si	No	CO <sub>2</sub>	Sitio/Territorio/ Producto	Directas + Indirectas
Umberto	Insitut für Umweltinformatik Hamburg GbH	Privado	Análisis de focos de emisiones		Si	Si	No	Si	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFC, PFC	Sitio/Territorio/ Producto	Directas + Indirectas
ISI Tool	Ministerio del Ambiente de Baden-Wurtemberg	Público	Inventario y proyecciones de emisiones para empresas del EU ETS	GHG Protocol	Si	No	Si	No	Todos los GEI	Sitio	Directas + Indirectas
Carbon Balance Sheet	Carbonetwork Corporation	Privado	Inventario, monitoreo y gestión financiera		Si	Si	Si	No	CO <sub>2</sub>	Sitio	Directas + Indirectas

Fuente: Adaptado de División Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, 2011.

Figura 4.2 Niveles de aplicación, marco metodológico y principales aplicaciones de la HC.



Fuente: Adaptada de Pon y Pon, 2009.

### 4.2.1 Protocolo de Gases de Efecto Invernadero

El Protocolo de Gases Efecto Invernadero (Protocolo GEI), fue implementado en el 2001 por el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) en conjunción con el World Resources Institute (WRI) tiene como objetivo establecer las bases para la contabilización de emisiones de los GEI. Es el resultado de una colaboración multilateral entre empresas, organizaciones no gubernamentales y gobiernos. El Protocolo GEI es un marco metodológico general que otorga lineamientos de trabajo para el desarrollo de herramientas de cálculo de emisiones (Valderrama et al., 2011).

La Iniciativa del Protocolo GEI integra dos estándares distintos, aunque se encuentran vinculados entre sí (WBCSD y WRI, 2005):

- Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI: documento que provee una guía detallada para empresas interesadas en cuantificar y reportar sus emisiones de GEI.
- Estándar de Cuantificación de Proyectos del Protocolo de GEI: guía para la cuantificación de reducciones de emisiones de GEI derivadas de proyectos específicos.

Protocolo GEI además de posicionarse como referente en términos de lineamientos generales, también ha desarrollado un conjunto de herramientas en forma de software, disponibles en su página de internet ([www.ghgprotocol.org](http://www.ghgprotocol.org)), para el cálculo de la HC inicialmente de empresas y luego de productos. La utilidad de este protocolo radica en mejorar la comprensión de las emisiones de GEI de una empresa a través del levantamiento de un de los inventarios de gases en las metas empresariales (tabla 4.4).

Tabla 4.4 Utilidad de los inventarios de GEI en las metas empresariales

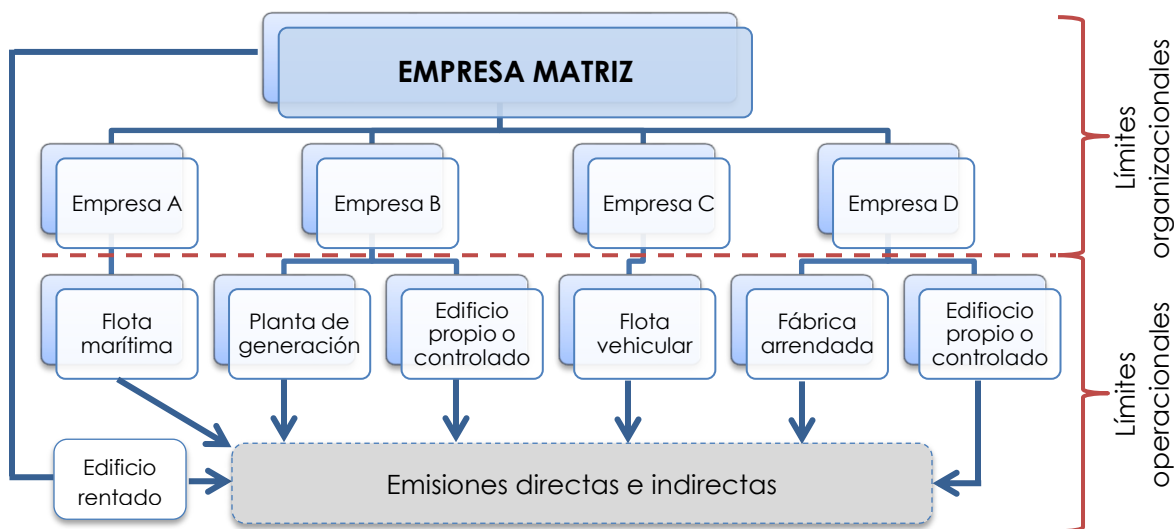
Utilidad	Características
Manejo de riesgos de GEI e identificación de oportunidades de reducción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar riesgos asociados a futuras restricciones de GEI</li> <li>• Identificar oportunidades de reducción en términos de costos</li> <li>• Establecer metas de GEI, contabilizar y reportar progreso</li> </ul>
Reporte público y participación en programas voluntarios de GEI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reporte voluntario de las partes involucradas de las emisiones de GEI y el progreso hacia el cumplimiento de metas de GEI</li> <li>• Reportar al gobierno y a programas de reporte de ONG, incluyendo registros de GEI</li> <li>• Eco-etiquetado y certificación de GEI</li> </ul>
Participación en programas obligatorios de reporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participación en programas gubernamentales de reporte a nivel nacional, regional o local</li> </ul>
Participación en mercados de GEI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apoyar programas internos de mercado de emisiones de GEI</li> <li>• Participación en programas externos de permisos "cap and trade"</li> <li>• Calcular impuestos al carbono y/o GEI</li> </ul>
Reconocimiento por actuación temprana	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer información para establecer una línea base y/o recibir crédito por actuación temprana.</li> </ul>

Fuente: WBCSD y WRI, 2005

#### 4.2.1.1 Determinación de los límites organizacionales y operacionales

El hecho de fijar los límites organizacionales, la empresa está seleccionando un enfoque que consolidará sus emisiones de GEI; este debe ser aplicado de manera consistente para definir aquellas unidades de negocio y operaciones que integran a la empresa con miras a la contabilidad y reporte de GEI. Ya establecidos los límites organizacionales (conjuntado todas las operaciones de las que es propietaria o tiene el control) una empresa pasa a determinar sus límites operacionales. Esto forma parte de la identificación de emisiones vinculadas a sus operaciones clasificándolas como emisiones directas o indirectas, y en elegir el rango de alcance de contabilidad y reporte para aquellas emisiones que son indirectas (figura 4.3).

Figura 4.3 Delimitación organizacional y operacional de una empresa



Fuente: Adaptado de WBCSD y WRI, 2005

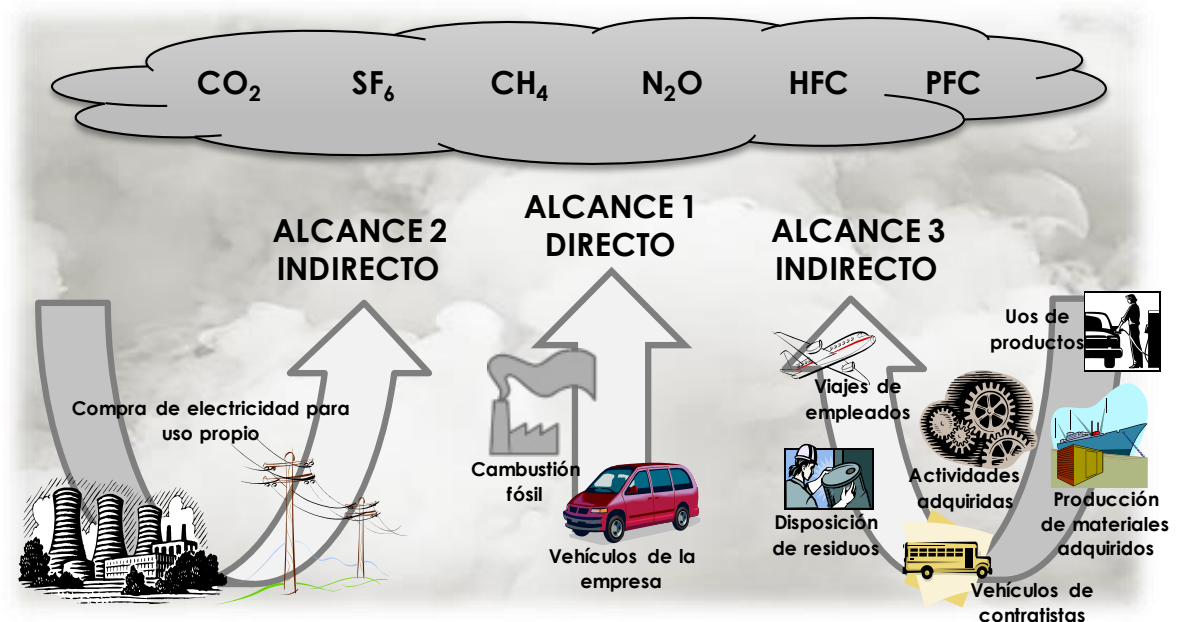
De acuerdo al Protocolo de GEI, para definir los límites operacionales se requiere identificar las fuentes de emisiones a ser incluidas en la medida. En Protocolo se establecen tres alcances de emisiones (Schneider y Samaniego, 2009):



1. Emisiones directas: encontradas en las fuentes propias o controladas por la empresa (derivadas de la quema de combustibles o debidas a ciertos procesos químicos).
2. Emisiones indirectas: emanadas de la generación de energía (calor o vapor) por terceros. Se dice que es indirecta aunque sea consecuencia de las actividades de la empresa puesto que fueron generadas o son controladas por terceros.
3. Otras emisiones indirectas: son consecuencia de las actividades de la organización que se llevan a cabo fuera de ésta y no son controladas o generadas por la misma (viajes, gestión y disposición de residuos, la producción de insumos, etc.).

La figura 4.4 ofrece una representación de la relación que hay entre los alcances y las actividades que producen emisiones (directas e indirectas) a lo largo de la cadena de valor de una empresa.

Figura 4.4 Alcances y emisiones a través de la cadena de valor



Fuente: Modificado de WBCSD y WRI, 2005

#### **4.2.1.2 Identificación y cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero**

Fijado el límite del inventario una vez que ha sido establecido, las empresas comúnmente calculan las emisiones de GEI utilizando los siguientes pasos (WBCSD y WRI, 2005):

a) Identificar fuentes de emisiones de GEI

El primero paso es catalogar las fuentes de emisiones de GEI circunscritas dentro de la empresa.

b) Selección del método de cálculo

La manera más común para calcular las emisiones de GEI es por medio de la aplicación de factores de emisión (FE) documentados. Éstos son cocientes calculados que relacionan emisiones de GEI a una medida de actividad en una fuente de emisión.

c) Recolectar datos de actividades y elegir factores de emisión

Para la mayoría de las empresas, las emisiones de alcance 1 serán calculadas en base a las adquisición de combustibles comerciales (gas natural, diesel, combustóleo, gasolina, etc.) empleando los FE publicados. Para las de alcance 2 se contabilizarán a partir del consumo de electricidad que se ha medido y de FE de emisión establecidos por quien provee la electricidad. Finalmente, las emisiones de alcance 3 se evaluarán con los datos de las actividades de la empresa, como el uso de combustible o los kilómetros recorridos por pasajeros, y FE.

d) Identificar fuentes de emisiones de GEI

Existen dos categorías principales de herramientas de cálculo: 1) intersectoriales aplicables a distintos sectores (incluyen: combustión fija y móvil, uso de HFC en refrigeración y aire acondicionado, e incertidumbre en la medición y estimación) y 2) sectoriales, diseñadas para el cálculo de emisiones en sectores específicos (aluminio, acero, cemento, petróleo, gas, pulpa y papel, etc.).

e) Enviar los datos de emisiones de GEI al nivel

Los procesos y herramientas designados para reportar datos requerirán de la infraestructura de información y comunicación, así como la cantidad de detalles que las oficinas centrales quieran que las plantas reporten. En este apartado se pueden incluir bases de datos disponibles a través de la red interna de la compañía o el internet, formatos de hojas de cálculo para ser llenados y enviados por correo electrónico a una oficina corporativa o de la división o formas de reporte en papel para ser enviadas por fax a una oficina corporativa o de la división.

En cuanto a los factores de emisión, en la tabla 4.5 que se presentan los valores que reflejan el uso de distintos componentes energéticos más comunes respecto a energía eléctrica y los combustibles fósiles se refiere.

Tabal 4.5 Factores de emisión respecto a materiales comúnmente empleados

Elemento/material	Factor de emisión de CO <sub>2</sub>
Energía eléctrica	0.39 Kg CO <sub>2</sub> /Kwh
Gas natural	0.20 Kg CO <sub>2</sub> /Kwh
Gasóleo/diésel	2.68 Kg CO <sub>2</sub> /Litro
GLP	1.60 Kg CO <sub>2</sub> /Litro
Propano/butano	1.43 Kg CO <sub>2</sub> /Litro
Gasolina	2.32 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Bioetanol	2.96 Kg CO <sub>2</sub> /Litro

Fuente: Jiménez-Herrero et al, 2011

#### 4.2.1.3 Reporte de emisiones de GEI

Las características de la información reportada deben ser que este sea relevante, completo, consistente, transparente y preciso. En dicho reporte tendrá que incluir los siguientes puntos:

- Descripción de la empresa y los límites del inventario
- Información de emisiones
- Información de desempeño (opcional)
- Información sobre compensaciones (opcional)

El nivel apropiado de reporte en el caso de las categorías de información opcional podrá ser determinado por los objetivos de la empresa y por el tipo de lectores que se espera tendrá el reporte. Los requisitos de reporte pueden variar en el caso de programas nacionales o voluntarios de GEI, o para propósitos internos de administración.

Cuando se trata de reportes públicos, es importante distinguir entre un simple resumen de un reporte público, como los que se publican en internet o en ciertas iniciativas voluntarias de reporte y reportes públicos completos que deben contener toda la información especificada.

#### **4.2.2 Publicly Available Specifications 2050**

El método Publicly Available Specification (PAS 2050), fue concebido en el año 2007 por el British Standards Institution (BSI), en conjunción con el Carbon Trust y el Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), ambas entidades del gobierno inglés. Está dirigido a la cuantificación de las emisiones de productos y servicios, y responde a las normativas de mayor importancia, ISO y a las del Protocolo GEI.

El PAS 2050 no es un programa que contenga una base de datos de factores de emisión, si no que se muestra como una guía metodológica que detalla paso por paso los criterios a establecer y que se tomarán en consideración (División Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, 2011).

La metodología PAS 2050 se enfoca única y exclusivamente en las emisiones de GEI creadas a través del ciclo de vida de un producto. No tomo en cuenta otros

posibles impactos ambientales, sociales y económicos, por lo tanto, lo que concierne a la biodiversidad, el uso del agua, las normas laborales y otros impactos de productos, son de menor relevancia (British Standards Institution, 2008). El método descrito en el PAS 2050 se puede utilizar para evaluar el ciclo de vida de las emisiones de GEI de cualquier tipo de producto. La tabla 4.6 describe la diferencia entre estos conceptos así como su aplicación.

- a) Bienes *Business-to-consumer* (B2C), donde el cliente es el usuario final  
(Materia prima→Elaboración→Distribución/venta→Consumo→Disposición)
- b) Bienes *Business-to-business* (B2B), donde el cliente es otra empresa que utiliza el producto como insumo para sus propias actividades  
(Materia prima→Elaboración→Distribución a la empresa del consumidor)
- c) Los servicios que pueden ser ya sea B2C o B2B

Tabla 4.6 Aplicación de PAS 2050 en los diferentes tipos de productos

	Bienes B2C	Bienes B2B	Servicios
Definición de la unidad funcional del producto	Tamaño común/ cantidad vendida a los consumidores	Tamaño común/ cantidad vendida a los consumidores de negocios	Común, oferta comprable
Mapa de procesos/límites	Incluye todas las etapas del ciclo de vida: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materia prima</li> <li>• Manufacturación</li> <li>• Distribución/menudeo</li> <li>• Utilización</li> <li>• Disposición/reciclaje</li> </ul>	Incluye todas las etapas del ciclo de vida hasta el punto del entrega al cliente: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materia prima</li> <li>• Manufacturación</li> <li>• Entrega hasta la puerta del cliente</li> </ul>	Varía según el tipo de servicio. Puede incluir: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Apertura/puesta en marcha</li> <li>• Uso constante</li> <li>• Clausura</li> </ul> Incluye todas las actividades, materiales, energía y desechos asociados con la provisión de una unidad de servicio
Obtención de información	←	Lo mismo para cualquier tipo de producto	→
Calculo e incertidumbre	←	Lo mismo para cualquier tipo de producto	→
Verificación/ comunicación	←	Lo mismo para cualquier tipo de producto	→

Fuente: Adaptada de British Standards Institution, 2008

#### **4.2.2.1 Fijación de objetivos**

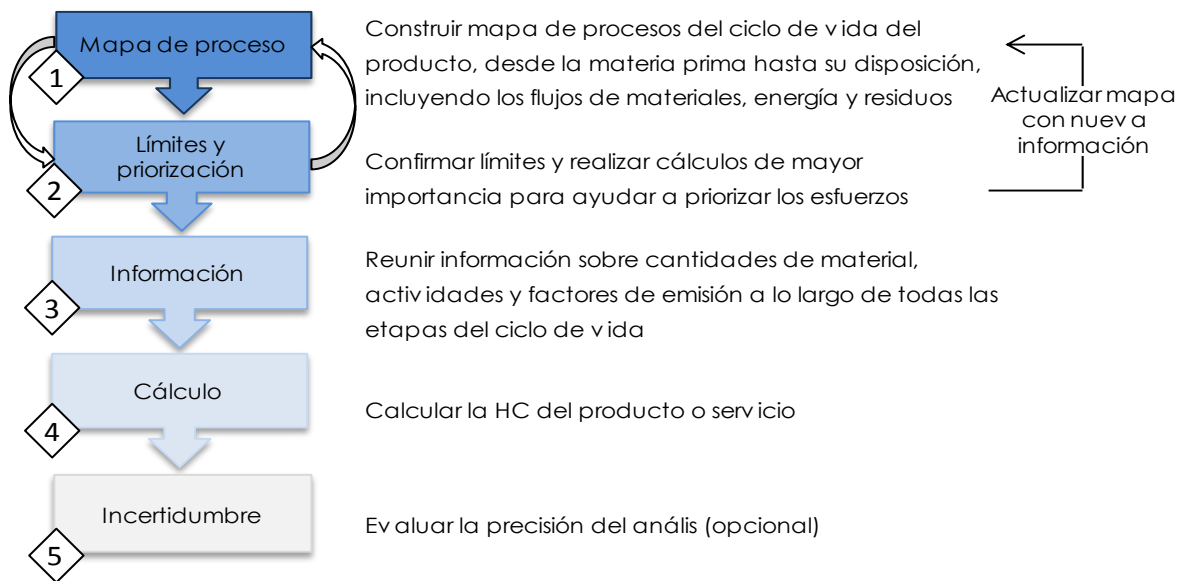
Los pasos iniciales deben considerarse de suma importancia, ya que éstos garantizan que la aplicación de PAS 2050 sea rápida y eficaz, lo que repercutirá en los resultados para toma de decisiones. En principio, para el primer paso se deben consensuar tres factores:

- a) Selección de objetivos: definir y acordar los objetivos para evaluar las emisiones de GEI de un producto o servicio, establece las bases para un proceso adecuado.
- b) Elección de productos: La selección de del producto deben seguir criterios que recaen directamente en los objetivos acordados inicialmente, y son un elemento clave de la limitación de la evaluación.
- c) Involucrar a los proveedores: La colaboración conjunta con los proveedores es fundamental para comprender el ciclo de vida del producto y la recopilación de información. Los límites de la empresa, el conocimiento de procesos, materiales, necesidades de energía y residuos tiende a variar de manera considerable.

#### **4.2.2.2 Calculo de la HC**

Apoyándose en cinco pasos básicos (figura 4.5), el PAS 2050 adopta un enfoque de LCA para la cuantificación de emisiones de GEI vinculadas a los bienes o servicios, lo que permite a las empresas encontrar oportunidades de reducir al mínimo las emisiones. La relevancia estará dada por las fuentes, información y métodos más apropiados en la evaluación del servicio o producto seleccionado; para complementación y consistencia se deberá incluir todos los GEI y almacenamiento; la precisión está enfocada a reducir parcialidad e incertidumbre; y finalmente la transparencia estará intrínseca a la comunicación y revelación suficiente de información que permita a los consumidores tomar sus propias decisiones (British Standards Institution, 2008).

Figura 4.5 Pasos para calcular la Huella de Carbón con PAS 2050



Fuente: Adaptada de British Standards Institution, 2008

La evaluación de la incertidumbre (paso cinco) en la HC de los productos, representa una medida de precisión. Ciertamente un estudio con el menor grado de incertidumbre posible, lo hace más confiable y certero. Sin embargo habrá organizaciones que decidan no analizar este factor.

Es ampliamente recomendable reducir la incertidumbre de nuestro estudio, poniendo hincapié en los siguientes puntos que suelen ser de gran ayuda a la hora de tener resultados más fiables (British Standards Institution, 2008):

- Reemplace los datos secundarios con información de buena calidad de las actividades primarias, por ejemplo, sustituir un factor estimado de consumo de electricidad por mediciones reales que le hace llegar su proveedor.
- Utilizar información secundaria de mejor calidad, tratando que ésta sea más específica, más reciente, más confiable y/o más completa.
- Mejorar el modelo usado para calcular la HC haciéndolo más representativo a la realidad.
- Realizar revisiones constantes y/o certificaciones de HC

No siempre se presenta el caso que los datos primarios tengan un grado de incertidumbre menor que los datos secundarios, pero una estimación de la de la misma es una buena manera de decidir si desea utilizar la información de la actividad primaria o secundaria para un proceso concreto y/o fuentes de emisiones.

#### **4.2.2.3 Perfilando resultados**

De acuerdo a los objetivos de la evaluación, se pueden llevar a cabo distintas acciones una vez calculada la HC para el producto en cuestión. Las organizaciones quizá deseen verificar la metodología y cálculos para brindar mayor fiabilidad a la hora de tomar decisiones internas o como un paso para realizar evaluaciones externas.

La validación de resultados, en general, resulta útil para verificar la HC con el fin de asegurarse de que cualquier acción o decisión estará basada en un correcto y consistente análisis. Sin embargo, el nivel de verificación dependerá de los objetivos trazados del proyecto. PAS 2050 especifica tres niveles de verificación de acuerdo a la manera en cómo la HC calcula será utilizada:

1. Certificación.

Al margen de certificadores externos acreditados por una organización reconocida internacionalmente, es aquí donde un auditor revisará el proceso utilizado para estimar la HC, las fuentes de información y cálculos y certificar si PAS 2050 ha sido utilizado correctamente y si la evaluación entra en conformidad.

2. Verificación de terceras partes.

Éstas deberán demostrar conformidad con los estándares reconocidos por entidades certificadoras y proporcionar una validación externa. Este enfoque puede no ofrecer el nivel de confidencialidad que si lo da organizaciones acreditadas.

3. Auto-verificación.



Si se elige la auto verificación, se debe seguir los lineamientos estipulados en ISO 14021.

En base a esto, se presentan las ocasiones de mitigación. La HC logra proveer invaluable percepción para ayudar a reducir las emisiones futuras y auxilia en la identificación de oportunidades para minimizarlas a lo largo de todas las fases del ciclo de vida del producto (tabla 4.7).

Tabla 4.7 Oportunidades más comunes de reducción de emisiones

Área	Descripción
Uso de energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambiar de electricidad a gas</li> <li>• Incrementar el uso de energías renovables</li> </ul>
Producción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuir los volúmenes de residuos</li> <li>• Incrementar la escala</li> <li>• Disminuir la cantidad de procesos</li> <li>• Cambiar prácticas de elaboración y mejorar la eficiencia</li> </ul>
Distribución	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir la calefacción/refrigeración en almacenamiento y transporte</li> <li>• Disminuir las distancias de viajes</li> </ul>
General	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incluir criterios de energía/carbón en consumidores</li> <li>• Cambiar el diseño/configuración/materiales del producto</li> <li>• Actualizar el equipo de fabricación</li> <li>• Mejorar la gestión de inventario</li> </ul>

Fuente: modificada de British Standards Institution, 2008

## 5.- CONCLUSIONES

Se realizó una investigación bibliográfica sobre tres indicadores ambientales de gran relevancia que abarcan aspectos relacionados a la condición de los recursos naturales, degradación, conservación y calentamiento global a causa de emisiones de GEI.

Al estudiar y detallar las metodologías para su empleo, se constató que conceptualmente suelen ser de fácil asimilación y no requieren de grandes gastos económicos a la hora de llevarlos a cabo. Sin embargo, el factor que podría considerarse más apremiante, dada la situación actual, es el tiempo de realización puesto que requieren, en ocasiones, de meses de trabajo y completa disposición del evaluador así como sus colaboradores. Algo que hay que tener muy en cuenta son las fuentes de información, de ellas depende la confiabilidad y relevancia de los resultados obtenidos. En este punto los gobiernos, tanto locales y nacionales, juegan un papel mayor a través de sus órganos de abastecimiento de servicios públicos y/o de regulación ecológica.

Las técnicas de evaluación aquí analizadas cuentan con metodologías específicas para ciertos sectores y/o niveles haciendo más adaptable su aplicación e incluso con guías para la dar a conocer los resultados de los estudios y recomendaciones de cómo emplearlos y publicarlos para darlos a conocer a los consumidores.

Se comprobó que a día de hoy los Indicadores Ambientales (IA), por medio de las cuentas de las huellas, son una invaluable fuente de información para quienes tienen a su cargo el cuidado del medio ambiente, hacen política verde o gestionan recursos naturales. Los IA son un instrumento de contabilidad que se desarrollan en base a metodologías científicas, los cuales reportan el estado actual de demanda o la cantidad de emisiones GEI (para el caso de la HC). Los estudios y análisis de las huellas que sean sólidas y precisas pueden auxiliarnos en

la toma decisiones hacia la sostenibilidad, y pueden mostrar con números el impacto de sus actividades hacia el medio ambiente de empresas, organizaciones, personas, grupos, sectores o países.

Las cuentas de las huellas son de naturaleza descriptiva y, en cualquiera de sus escalas, sólo lanzan datos cuantitativos. Son catalogados como una herramienta de soporte y en ningún caso llegan a determinar o hacer suposiciones en sí mismas sobre quién o qué debería estar usando qué y en qué cantidad. Estas son elecciones sociales y políticas que los IA no pueden hacer con los resultados su aplicación.

Ningún modelo o conjunto de IA pueden capturar la complejidad de los diversos sistemas ecológicos que existen, por lo que siempre será recomendable realizar otros estudios complementarios ya que, como suele suceder con cualquier conglomerado de información, una imagen más completa y detallada del planeta puede obtenerse al combinar distintos IA centrados en aspectos importantes de la sostenibilidad.

Por otro lado, el apoyo al desarrollo de estudios y difusión de las cuentas de la huellas suele ser escaso en países poco desarrollados, en parte porque sus necesidades primordiales están basadas en fortalecer su economía sin importar el costo ambiental que esto conlleve, pero también es debido al desconocimiento de las huellas y más concretamente de sus alcances y metodologías. Caso contrario se alcanza a apreciar en países altamente desarrollados que han logrado recientemente disminuciones importantes de contaminación ambiental y su tasa de agotamiento de patrimonios ambientales. Ciertamente es que éstos suelen ser quienes más contaminan y sobreexplotan los recursos naturales, pero la misma sociedad, y en ocasiones hasta sus gobiernos, son quienes les demandan acciones sostenibles para la conservación del medio ambiente.

El patrón común que se encontró en estas naciones fue el hecho de contar con mayor infraestructura, número de entidades regulatorias autónomas y sobre todo resalta el hecho de que sus niveles de información ecológica están por encima de los demás países, contando con programas ambientales más integrados a sus

necesidades reales, sin mencionar las rigurosas penalizaciones a quienes infringen sus normativas en materia ambientalista. Mientras que Francia, Inglaterra, Holanda, España, Japón, Canadá llegan a elaborar y publicar anualmente hasta medio centenar estudios de huellas, además de poseer sus propias agendas medioambientales que tratan de manera prioritaria problemas como la contaminación atmosférica y la gestión de recursos entre otros temas, lo que habla de la importancia que se le da a la educación e interés ambiental por parte de sus habitantes y gobiernos, en esta parte de la región ese número no alcanza ni siquiera la decena.

Regionalmente hablando, las iniciativas de la aplicación de estudios de huellas, y posteriormente el uso adecuado de sus resultados, dista mucho de ser consideradas como útiles para la mayoría de los sectores, dejando al descubierto la desinformación sobre su potencial corporativo y social.

## 6.- REFERENCIAS

Mauritius Country Review (2012), Global Environmental Snapshot, CountryWatch Incorporated, pp. 180-191.

Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (2009), Ciudades y contaminación ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, pp. 66-71.

World Wildlife Fund (2012), Informe Planeta Vivo 2012.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006), atlas geográfico del medio ambiente y recursos naturales, México, SEMARNAT.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011), 1.- Los indicadores ambientales, [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores11/conjuntob/00\\_conjunto/marco\\_conceptual.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores11/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual.html), consultado en Octubre de 2012.

Quiroga-Martínez, R. (2007), Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe, División de Estadística y Proyecciones Económicas, Chile, Naciones Unidas-CEPAL.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2003), Indicadores ambientales, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Panamá.

Antón, D. y Díaz-Delgado, C. (2002), Sequía en un mundo de agua, Costa Rica, Piriguazú.

Chapagain, A. y Hoekstra, A. (2004), Water footprint of nations. Volume 1: main report. Value of water research report series, No. 16, Delft, the Netherlands, UNESCO-IHE.

Hoekstra, A. y Hung, P. (2002), Virtual water trade, Quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, Value of water research report series, No. 11, Delft, the Netherlands, UNESCO-IHE.

Aldaya, M. (2012), Introducción a la Evaluación de la Huella Hídrica, Seminario Internacional: Información Estadística y Geográfica para el Mejor Manejo del Agua en México, INEGI-UAM.

Rodríguez-Casado, R., et ál. (2008), La huella hidrológica de la agricultura Española, Papeles de agua virtual, No. 2, Madrid, Fundación Marcelino Botín. Pedrueca.

Mekonnen, M. y Hoekstra, A. (2011), The water footprint of electricity from hydropower, Value of water research report series No. 51, Delft, the Netherlands, UNESCO-IHE.

Aldaya, M. y Hoekstra, A. (2009), The water needed to have italians eat Pasta and pizza, Value of water research report series No. 36, Delft, the Netherlands, UNESCO-IHE.

Van-Oel, P. et al. (2009), The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment, Ecological Economics 69 (2009) 82–92.

Aldaya, M. et al. (2009), Water footprint and virtual water trade in Spain, Garrido, España.

Aldaya, M. y Llamas, R. (2008), Water footprint analysis for the guadiana river basin, Papeles del agua virtual No. 3, Madrid, Fundación Marcelino Botín. Pedrueca.

Gerbens-Leenes, P. y Hoekstra, A. (2008), Business water footprint accounting: a tool to assess how production of goods and services impacts on freshwater resources worldwide, Value of water research report series no. 27, Delft, the Netherlands, UNESCO-IHE.

Velázquez, E. (2009), Agua virtual, huella hídrica y el binomio agua-energía: repensando los conceptos, Dpto. Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica, Sevilla, Universidad Pablo de Olavide.

Comisión Nacional del Agua (1999), Ley de aguas nacionales y su reglamento, México, Centro Interamericano de Recursos Hídricos.

Grajales-Quintero, A. et al. (2010), Los nuevos conceptos sobre "agua virtual" y "huella hídrica" aplicados al desarrollo sostenible: implicaciones de la agricultura en el consumo hídrico, ISSN 0568-3076.

García-Casillas, I. y Briones-Sánchez, G. (2007), Sistemas de riego por aspersión y goteo, México, Trillas.

Water Footprint Network (2008), <http://www.waterfootprint.org/?page=files/GlobalWaterFootprintStandard>, consultado en Septiembre de 2011.

Hoekstra, A. et al. (2011), The water footprint assessment manual. Setting the global standard, London, Washington, DC, Earthscan.

Environmental Protection Agency (2012), Water: Total Maximum Daily Loads (303d), <http://water.epa.gov/lawsregs/lawsguidance/cwa/tmdl/index.cfm>, consultado en diciembre de 2012.

Wackernagel, M. et al. (1999), National natural capital accounting with the ecological footprint concept, *Ecological Economics* 29 (1999), pp. 375–390.

Leiva-Mas, J. et al. (2010), Metodología de cálculo de la huella ecológica en industrias, *Centro Azúcar* 37(2):41-46, Abril-Junio, 2010.

Gottlieb, D. et al. (2012), Analyzing the ecological footprint at the institutional scale: The case of an Israeli high-school, *Ecological Indicators* 18 (2012) pp. 91–97

Global Footprint Network (2011), Preguntas técnicas frecuentes, [http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/frequently\\_asked\\_technical\\_questions/#gen2](http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/frequently_asked_technical_questions/#gen2), consultado en febrero de 2013.

Ruževičius, J. (2011), Ecological footprint: Evaluation methodology and international benchmarking, *Current Issues of Business and Law*, 2011, 6(1), pp. 11–30.

Calcott, A. y Bull, J. (2007), Ecological footprint of British city residents, *World Wildlife Fund*, UK.

Inostroza-Pino, L., (2005), La huella urbana y ecológica de Magallanes. Una mirada sobre nuestra insostenibilidad, *Urbano*, Chile.

Wilson, J. y Grant, J. (2009), Calculating ecological footprints at the municipal level: what is a reasonable approach for Canada?, *Local Environment* Vol. 14, No. 10, Routledge.

Hayden, A. y Shandra, J. (2009), Hours of work and the ecological footprint of nations: an exploratory analysis, *Local Environment* Vol. 14, No. 6, Routledge.



Hopton, M. y White, D. (2012), A simplified ecological footprint at a regional scale, *Journal of Environmental Management* 111 (2012) 279-286.

Mamouni-Limios, E. et al. (2009), Giving the consumer the choice: A methodology for Product Ecological Footprint calculation, *Ecological Economics* 68 (2009) 2525–2534.

Ewing, B. et al. (2008), *The Ecological Footprint Atlas 2008*. Oakland, Global Footprint Network.

Alfaro-Barbosa, J. et al. (2001), *Ciencias del ambiente*, México, CECSA.

Global Footprint Network, (2011), *What happens when an infinite-growth economy runs into a finite planet?*, Oakland, Global Footprint Network.

Ruževičius, J. (2009), Ecological footprint as an indicator of sustainable development, *Economics and management: 2010*, pp. 711-718.

Borucke, M. et al. (2013), Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework, *Ecological Indicators* 24 (2013), pp. 518-533.

Global Footprint Network (2009), *Ecological Footprint Standards 2009*. Oakland

Wiedmann, T. y Minx, J. (2008), *A definition of "Carbon Footprint"*, *Ecological Economics Research Trends*, USA, Nova Science Publishers.

Schneider, E. y Samaniego J. (2009), *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe,

Pon, D. y Pon J. (2009), Evaluando el impacto climático del consumo: la huella de carbono, España, CONAMA 9.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/spmssp-b.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/spmssp-b.html), consultado en abril de 2013.

World Business Council for Sustainable Development y World Resources Institute (2005), Protocolo de Gases de Efecto Invernadero, México, SEMARNAT.

Hale, T. et al. (2011), Carbon footprint reductions via grid energy storage systems, International journal of energy and environment Volume 2, Issue 4, 2011 pp.641-646

Departamento de Economía Agraria y Green Solutions (2011), Medición y mitigación de la Huella de Carbono en la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Pontificia Universidad Católica de Chile-Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Chile.

Tortajada, R. (2009), La huella de carbon en Navarra, Ecosostenible No. 50 – Abril, España.

Álvarez-Uría, P. y De la Cruz-Leiva, J., (2009), La huella de carbono, Ecosostenible, No. 50 – Abril, España.

Betancourt, E. (2012), Impacto de la huella de carbono, en la competitividad exportadora regional, Global Conference on Business and Finance Proceedings Volume 7, Number 2.

Consultoría Tú Transformas (2011), Estudio de Huella de Carbono, España.

División Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos (2011), Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América

Latina, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)-Naciones Unidas.

Pandey, D. et al. (2010), Carbon footprint: current methods of estimation, Springer Science and Business Media B.V., Environ Monit Assess 178:135–160

Valderrama, J. et al. (2011), Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos, España, Formación Universitaria Vol. 4 No. 3.

Jiménez-Herrero, L. et al. (2011), Manual de cálculo y reducción de huella de carbono para actividades del sector comercio, Observatorio de la Sostenibilidad en España, España.

British Standards Institution (2008), Guide to PAS 2050 How to assess the carbon footprint of goods and services, Reino Unido, The Charlesworth Group.